Entwicklung einer funktionalen Referenzarchitektur für Assistenzsysteme zur energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebs

Vom Fachbereich Maschinenbau an der
Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
eingereichte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Peter Korzenietz
aus Heydebreck

Erstgutachter:	Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner
Zweitgutachter:	Prof. Dr. techn. Christian Beidl

Darmstadt 2017

Korzenietz, Peter: Entwicklung einer funktionalen Referenzarchitektur für Assistenzsysteme zur energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebs

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUprints: 2018

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-72904

Tag der mündlichen Prüfung: 18.04.2017

Veröffentlichung unter CC BY-NC-ND 4.0 International

https://creativecommons.org/licenses/

Vorwort

Diese Arbeit entstand während und im Anschluss meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt. Die Inhalte der Dissertation wurden im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Forschungsprojektes eco_2DAS erarbeitet.

Meinem Doktorvater und Fachgebietsleiter Herrn Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner gilt ein ganz besonderer Dank für die vielen kritischen Diskussionen, gestalterischen Freiräume und nicht zuletzt das entgegengebrachte Vertrauen. Seine Unterstützung hat entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit und meiner persönlichen Entwicklung beigetragen.

Bei Herrn Prof. Dr. techn. C. Beidl bedanke ich mich für die Übernahme des Korreferats, sein Interesse an der Arbeit sowie die wertvollen inhaltlichen Ratschläge im Rahmen von eco_2DAS.

Einen ganz wesentlichen Beitrag für die Entstehung dieser Arbeit haben das angenehme Arbeitsklima und die freundschaftliche Kollegialität am Fachgebiet geleitet. Daher gilt mein Dank allen Kollegen und Mitarbeitern von FZD, einschließlich der Werkstatt und des Sekretariats.

Ganz explizit danke ich Herrn Matthias Kluin, der für mich im Rahmen unseres Forschungsprojektes als Diskussionspartner immer zur Verfügung stand und dem ich zahlreiche Anregungen verdanke.

Nicht zuletzt danke ich ganz herzlich meiner Familie für die vielfältige Unterstützung in allen Lebenslagen. Insbesondere danke ich meinen Eltern für Ermöglichung einer ausgezeichneten Ausbildung.

Mein herzlicher Dank gebührt schließlich meiner Partnerin Linda, durch deren Verständnis und Rückhalt es erst möglich war, die vorliegende Arbeit nach meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter zu vervollständigen.

Peter Korzenietz Darmstadt im Januar 2017

Inhaltsverzeichnis

Vorwort ..... **III**

Inhaltsverzeichnis ..... **IV**

Abkürzungen ..... **VII**

Formelzeichen und Indizes ..... **VIII**

Kurzzusammenfassung ..... **IX**

1 Einleitung und Zielsetzung **1**
1.1 Motivation 1
1.2 Architekturen 3
1.2.1 Begriffsdefinitionen 3
1.2.2 Allgmeiner Zweck einer Architektur 6
1.2.3 Konzept einer universellen Systemarchitektur 7
1.3 Forschungsziele 10
1.4 Methodik und Aufbau der Arbeit 11

2 Stand der Forschung und Technik **13**
2.1 Begriffsdefinitionen 13
2.2 Theoretische Grundlagen 14
2.2.1 Fahrer-Fahrzeug-Umwelt-Modell 14
2.2.2 Energetische Wirkkette im Fahrzeug 15
2.2.3 Energetischer Einfluss des Fahrers 24
2.2.4 Allgemeine energetische Optimierungsziele 27
2.2.5 Allgemeine Assistenzansätze für die energetischen Optimierung 28
2.3 Vorausschaubasierte Systeme zur energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebs 30
2.3.1 Navigationssysteme 31
2.3.2 Fahrweisenoptimierende Systeme 32
2.3.3 Betriebsweisenoptimierende Systeme 37
2.3.4 Vorausschauende Betriebsstrategien für Hybridfahrzeuge 38
2.3.5 Fazit 39
2.4 Vorausschauinformationsquellen 40
2.5 Architekturaspekte für vorausschaubasierte Assistenzsysteme 43
2.5.1 Funktionale Grobstruktur 43
2.5.2 Hierarchisierung von Funktionalitäten 44
2.5.3 Modularität und Skalierbarkeit 48

2.5.4 Fazit ... 49

3 Anforderungsanalyse ... 50
3.1 Anwendungsszenarien ... 50
3.1.1 Basisszenarien zur energetischen Optimierung ... 50
3.1.2 Entwicklungsszenarien ... 52
3.2 Ontologie von Umfeldvorausschauinformationen ... 53
3.2.1 Definition Vorausschau ... 53
3.2.2 Vorausschauhorizont ... 54
3.2.3 Vorausschauinformationen ... 55
3.2.4 Gewissheit von Vorausschauinformationen ... 56
3.2.5 Klassifikation ... 57
3.3 Funktionale Anforderungen ... 60
3.3.1 Vorgehen zur Ableitung funktionaler Anforderungen ... 60
3.3.2 Funktionale Anforderungen an eine funktionale Referenzarchitektur für Systeme zur energetischen Optimierung des Fahrbetriebs ... 61
3.4 Nichtfunktionale Anforderungen ... 65
3.4.1 Allgemeine nichtfunktionale Anforderungen ... 65
3.4.2 Nichtfunktionale Anforderungen an eine funktionale Referenzarchitektur für Systeme zur energetischen Optimierung des Fahrbetriebs ... 66
3.4.3 Fazit ... 70

4 Entwicklung der funktionalen Referenzarchitektur ... 72
4.1 Optimierungsbereich ... 73
4.1.1 Strukturierung der Optimierungsfunktionen ... 73
4.1.2 Optimierungsfunktionen ... 75
4.1.3 Koordination und Steuerung von Optimierungsfunktionen ... 83
4.2 Architekturschemata ... 85
4.2.1 SMPA-Architektur ... 86
4.2.2 Verhaltensbasierte Architekturen ... 86
4.2.3 Ebenenbasierte Architekturen ... 87
4.3 Funktionale Grobarchitektur ... 90
4.3.1 Funktionsbereiche ... 90
4.3.2 Varianten für die funktionale Grobarchitektur ... 92
4.3.3 Variantenbewertung und Auswahl ... 98
4.4 Funktionale Referenzarchitektur ... 101
4.4.1 Übersicht ... 101
4.4.2 Energetische Optimierung ... 101
4.4.3 Umfeldmodell ... 105
4.4.4 Energiewandlungsmodell ... 106
4.4.5 Fahrermodell ... 106
4.4.6 Assistenzmodul ... 107
4.4.7 Mensch-Maschine-Schnittstelle ... 108

5 Architekturbewertung 109
5.1 Vorgehen zur Architekturbewertung 110
5.1.1 Bewertungsverfahren von Systemarchitekturen 110
5.1.2 Vorgehen zur qualitativen Bewertung der funktionalen Referenzarchitektur 113
5.2 Bewertungsauslegung 114
5.2.1 Qualitätsbaum 114
5.2.2 Qualitätsszenarien 115
5.3 Architekturansätze 119
5.4 Bewertung der Qualitätsmerkmale der Referenzarchitektur 122
5.4.1 Funktionalität 122
5.4.2 Änderbarkeit 124
5.4.3 Testbarkeit 128
5.5 Diskussion der Ergebnisse 130
5.5.1 Umsetzung der funktionalen Anforderungen 130
5.5.2 Umsetzung der nichtfunktionalen Anforderungen 132
5.5.3 Diskussion der zentralen Fragestellungen 133

6 Gesamtfazit und Ausblick 137

A Optimierungsfunktionen 140

B Qualitätsszenarien 143

C Abgeleitete Architekturinstanzen 147

Literaturverzeichnis 150

Eigene Veröffentlichungen 157

Lebenslauf 158

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
ACC	Adaptive Cruise Control
ATAM	Architecture Tradeoff Analysis Method
BW	Betriebsweise
CVT	Continuous Variable Transmission
E	Energie
E/E	Elektrik / Elektronik
EM	Elektromotor
EVA	Eingabe-Verarbeitung-Ausgabe
FA	Funktionale Anforderung
FS	Fahrstreifen
FW	Fahrweise
G	Generator
GNSS	Global Navigation Satellite System
HCU	Hybrid Contol Unit
HEV	Hybrid Electric Vehicle
HMI	Human Maschine Interface
HW	Hardware
KV	Kollisionsvermeidung
LKAS	Lane Keeping Assist
LZA	Lichtzeichenanlage
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
MPP	Most Probable Path
MT	Manual Transmission
NA	Nebenaggregat
MPR	Modellbasierte Prädiktive Regeleung
MSS	Mensch-Maschine-Schnittstelle
QS	Qualitätsszenario
RCS	Real-Time Control System
SAAM	Software Architecture Analysis Method
SMPA	Sense-Model-Plan-Act
SoC	State-of-Charge
SW	Software
TMC	Traffic Message Channel
V2X	Vehicle-To-X
VKM	Verbrennungskraftmaschine

Formelzeichen und Indizes

Symbol	Einheit	Beschreibung
β	rad	Steigungswinkel der Fahrbahn
ε	-	Drehmassenzuschlagsfaktor
η	-	Wirkungsgrad
ρ	kg/m^3	Dichte
A	m^2	Stirnfläche des Fahrzeugs
F	N	Kraft
M	Nm	Drehmoment
P	W	Leistung
a	m/s²	Beschleunigung
c	-	Widerstandsbeiwert
f_R	-	Rollwiderstandbeiwert
g	m/s²	Gravitationskonstante
i	-	Getriebeübersetzung
m	kg	Masse
v	m/s	Geschwindigkeit

Index	Beschreibung
Ant	Antrieb
B	Beschleunigung
Fzg	Fahrzeug
EW	Energiewandler
G	Getriebe
L	Luft
Luftw	Luftwiderstand
NF	Nebenfunktionen
N	normal
R	Rad
Radw	Radwiderstand
S	Steigung
Tr	Triebstrang
W	Widerstand
Verl	Verlust
VKM	Verbrennungskraftmaschine
chem	chemisch
elek	elektrisch
kin	kinetisch
mech	mechanisch
pot	potentiell
rel	relativ

Kurzzusammenfassung

Vor dem Hintergrund steigender Bedeutung von Energieeffizienz im Bereich der Fahrzeugtechnik nimmt die Forschungs- und Entwicklungstätigkeit für Assistenzsysteme zur energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebs zu. Im Rahmen der Entwicklung dieser Systeme tragen Systemarchitekturen dazu bei, die Komplexität beherrschbar zu machen und das Systemverständnis zu erhöhen. Systemarchitekturen, die dabei primär funktional getriebenen sind und den Anforderungen lediglich einzelner Nutzungsfälle genügen, erschweren jedoch ihre Übertragbarkeit und Erweiterbarkeit.

Gegenstand dieser Arbeit ist daher die Untersuchung der Fragestellung, wie eine funktionale Architektur beschaffen sein kann, um für den gesamten betrachteten Anwendungsbereich eine breite Anwendbarkeit sowie Robustheit gegenüber Änderungen aufzuweisen. Das Ziel der Arbeit besteht somit in der Entwicklung einer funktionalen Referenzarchitektur für den Anwendungsbereich der Assistenzsysteme zur energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebs sowie deren Bewertung.

Gemäß einem Top-Down-Ansatz wird zunächst der Energiefluss während des Fahrzeugbetriebes betrachtet und die möglichen Freiheitsgrade zur Energieflussoptimierung abgleitet. Diese Freiheitsgrade dienen als Grundlage für die Definition von grundlegenden Szenarien zur energetischen Optimierung, zu deren Bewältigung Assistenzsysteme entsprechende Funktionen enthalten müssen. Das Ergebnis dieses Vorgehens stellt die Zusammenstellung der relevanten funktionalen Anforderungen an die Referenzarchitektur dar. Neben den funktionsgetriebenen Szenarien werden sog. Entwicklungsszenarien zusammengestellt, die die mögliche Nutzung der Referenzarchitektur im Entwicklungsprozess beschreiben. Diese Entwicklerszenarien bilden die Grundlage für die Ableitung von qualitativen Anforderungen an die Referenzarchitektur. Die funktionalen und qualitativen Anforderungen stellen das Ergebnis der Anforderungsanalyse dar.

Der zweite Teil der Arbeit befasst sich mit der Entwicklung der Referenzarchitektur basierend auf den zuvor ermittelten funktionalen und qualitativen Anforderungen. Der als Ergebnis hergeleitete Architekturentwurf sieht eine grundsätzliche Systemstrukturierung in drei Ebenen vor, in die die Funktionen zur vorausschaubasierten Planung von energieeffizienten Routen, Fahrweisen und Betriebsweisen bzw. Betriebsstrategien verortet werden. Während die Missionsebene (oberste Ebene) die Optimierungsfunktionen für einen fernen Vorausschauhorizont aufnimmt, werden die Optimierungsfunktionen für die nahen und mittleren Horizonte der Verhaltensebene (unterste Ebene) zugeordnet. Durch die Möglichkeit des Parallelbetriebs mehrerer unterschiedlicher Optimierungsfunktionen in der Verhaltensebene, aus der jedoch stets nur ein Ergebnis in

Form einer Trajektorie zur Umsetzung bereitgestellt werden darf, leitet sich der Bedarf nach einer Koordination bzw. Arbitierung ab. Die Referenzarchitektur erfüllt diese Anforderung, indem sie eine vorausschaubasierte Planung der Optimierungsfunktionen in der übergeordneten Koordinationsebene (mittlere Ebene) mit einer ergebnisorientierten Bereitstellung von kostenminimalen Trajektorien durch einen nachgelagerten Arbitrierungsansatz vereint. Als Schnittstellen zur Vorausschausensorik bzw. zur Aktorik und Mensch-Maschine-Schnittstelle werden ein Umfeldmodell bzw. ein Assistenzmodul im Architekturentwurf vorgeschlagen. Während das Umfeldmodell die für die verschiedenen Ebenen notwendigen Vorausschauinformationen bereitstellt, sorgt das Assistenzmodul nach der Optimierung für eine assistenzkonzeptabhängige Aufarbeitung und Ausgabe der Optimierungsergebnisse.

In der abschließenden qualitativen Architekturbewertung wird dargelegt, wie die verwendeten Architekturprinzipien und -ansätze die Erfüllung der geforderten Qualitätsmerkmale Funktionalität, Änderbarkeit und Testbarkeit unterstützen. So erhöht das Prinzip der vorausschauenden Berücksichtigung von Optimierungsfunktionen die universelle Anwendbarkeit der Referenzarchitektur, indem es potentielle Neuanwendungen und zukünftige Änderungen bereits in den Architekturentwurf mit einfließen lässt. Die anderen Architekturansätze, insbesondere die Ebenenorientierung und Verteilung der Entscheidungskompetenz, erhöhen hingegen die Anpassbarkeit und Testbarkeit, indem sie zu einer Modularsierung der Referenzarchitektur beitragen.

Als Ergebnis dieser Arbeit liegt erstmalig eine Referenzarchitektur für Systeme zur energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebs vor. Die Referenzarchitektur stellt dabei eine Grundlage für die Ableitung von konkreten Architekturinstanzen dar, die explizit das Qualitätsmerkmal der Änderbarkeit adressieren. Die Referenzarchitektur fasst dabei für den betrachteten Anwendungsbereich geeignete Konzepte, Entscheidungen und Lösungen zusammen und kann somit dazu beitragen den Aufwand für einen anwendungsfallbezogenen Architekturentwurf zu reduzieren. Durch das Aufzeigen des Erkenntnisweges werden die getroffenen architektonischen Entscheidungen, die zur ermittelten Referenzarchitektur geführt haben, transparent gemacht. Dem Leser wird somit ermöglicht die getroffenen Entscheidungen nachzuvollziehen und Einschränkungen hinsichtlich der Anwendbarkeit zu identifizieren.

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Motivation

Im Zuge der Sicherung der individuellen Mobilität, die ein Grundbedürfnis jeder modernen Gesellschaft darstellt[1], gewinnt die Steigerung der Energieeffizienz bei Fahrzeugen zusehends an Bedeutung. Getrieben wird diese Entwicklung durch die schwindende Verfügbarkeit von fossilen Kraftstoffen, gesetzgeberische/politische Randbedingungen (insbesondere Beschränkung der CO_2-Emissionen) sowie die ökologischen Kundenanforderungen[2].

Die Elektrifizierung des Antriebsstranges von der Hybridisierung bis hin zum reinen Elektrofahrzeug gewinnt dabei stetig an Bedeutung[3], denn durch die Elektrifizierung lassen sich konventionelle Antriebe „hinsichtlich der Leistung und des Verbrauches sowie den Ausstoß von umweltschädlicher Gase noch weiter optimieren“[4]. Gleichwohl wird von Experten die These geäußert, dass elektrische und Plug-in-Hybridfahrzeuge in absehbarer Zeit die konventionellen Antriebe nicht ersetzten werden[5] bzw. „Elektrofahrzeuge in den nächsten 10 Jahren nur eine untergeordnete Rolle spielen“ werden[6]. Begründen lässt sich das in erster Linie durch die beschränkte Reichweite, die der gegenwärtige Batterietechnik geschuldet ist. Aus diesem Grunde erscheint es gewinnbringend auch im Bereich der Elektromobilität Maßnahmen zur Effizienzsteigerung zu betrachten um die Nutzungseinschränkung minimieren zu können.

Allgemeine fahrzeugtechnische Maßnahmen befassen sich dabei in erster Linie mit der Optimierung von Komponenten, wie beispielsweise der Optimierung des Verbrennungsmotors hinsichtlich der thermodynamischen Effizienz mittels mechanischer Verfahren. In Kombination mit neuen Brennverfahren lassen sich weitere Einsparungen von Kraftstoffverbrauch und CO_2-Emissionen von bis zu 50% erwarten[7]. Weitere Maßnah-

[1] Wallentowitz et al. (2009): Strategien zu Elektrifizierung des Antriebsstranges, S.1

[2] Wallentowitz et al. (2009): Strategien zu Elektrifizierung des Antriebsstranges, S.3

[3] Bratzel (2012): The Car of the Future is Driven Electrically!?, S. 16

[4] Wallentowitz et al. (2009): Strategien zu Elektrifizierung des Antriebsstranges, S.70

[5] Kalmbach et al. (2011): Automotive landscape 2025, S.56

[6] Bratzel (2012): Das Auto der Zukunft fährt elektrisch!?, S. 20

[7] Radke (2013): Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugendurch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien, S. 4

men zur Minimierung des Energiebedarfs sind die Reduktion des Fahrzeuggewichts mittels Leichtbau oder die Verringerung des Luft und Rollwiderstands[8]. Viele Maßnahmen lassen sich zwecks weiterer Effizienzsteigerung kombinieren, sind jedoch mit erheblichen Zusatzkosten verbunden[9].

Neben den komponentenbezogenen Maßnahmen bildet der reale Fahrbetrieb selbst eine Möglichkeit zur Beeinflussung der Effizienz. Durch die Wahl einer Route, durch die Fahrzeugführung auf eine bestimmte Art und Weise (persönlicher Fahrstil) und die Bedienung des Fahrzeuges (z. B. Bedienung des Getriebes) hat der Fahrer direkten Einfluss auf den Gesamtenergieverbauch bzw. die Energieeffizienz. Diesen Ansatzpunkt nutzend, können Fahrerassistenzsysteme verwendet werden, um den Fahrer zu unterstützen, möglichst energieeffizient zu fahren. Dabei sind zahlreiche Maßnahmen, wie die Unterstützung bei einer energieoptimalen Längsführung, nicht explizit auf ein Antriebskonzept festgelegt, sondern können (ggf. mit Anpassungen der Assistenzfunktion) auch für andere Antriebskonzepte verwendet werden.

Neben der Elektrifizierung des Antriebsstranges stellt die Vernetzung des Fahrzeuges mit seiner Umwelt einen weiteren großen Trend in der Fahrzeugentwicklung dar[10]. Das Ziel ist dabei, das Fahrzeug sowohl mit der Infrastruktur und anderen Fahrzeugen, als auch mit dem Internet zu verbinden, um neue Funktionen und Services anbieten zu können. Diese Entwicklung birgt dabei auch das Potential Assistenzsysteme zur energetischen Optimierung des Fahrbetriebs in ihrem Funktionsumfang zu erweitern. So kann durch die Vernetzung mittels Car-2-X beispielsweise die Quantität und Qualität an Vorausschauinformationen deutlich erweitert werden, verglichen mit reiner bordautarker Sensorik (z. B. durch Radar oder Kamera). Eine Anbindung an das Internet bzw. an Cloud-Dienste kann zusätzliche Verkehrsinformationen liefern, die für eine energetische Optimierung der Fahrroute herangezogen werden können.

Bereits die auf Vorausschau basierenden Einzelassistenzfunktionen sind gekennzeichnet durch ein hohes Maß an Vernetzung mit Sensorik bzw. Vorausschaukomponenten, der Fahrzeugaktorik und der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Werden die Einzelfunktionalitäten zum Zweck weiterer Effizienzsteigerungen zusätzlich kombiniert, steigt die durch die Vernetzung resultierende Komplexität deutlich an. Das hat zur Folge, dass sowohl Entwicklungs- und Applikationsaufwand als auch der Aufwand für das Testen und die Validierung steigen. Ein weiterer Aspekt in diesem Zusammenhang ist das steigende

[8] Neunzig (2003): Fahrerassistenzsysteme zur Verbrauchsminderung von Kraftfahrzeugen, S.20

[9] Radke (2013): Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugendurch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien, S. 4

[10] Hudi (2012): Trends and Future Challenges for E/E Development, S. 14ff

Risiko, den Fahrer durch verschiedene funktionsindividuelle Mensch-Maschine-Schnittstellen sowie Funktionsgrenzen zu überfordern.

Um die steigende Komplexität, die sich durch die Kombination der verschiedenen Funktionalitäten ergibt, beherrschbar zu machen, bedarf es einer grundlegenderen Architekturbetrachtung. Darin gilt es, sämtliche energieeffizienzrelevanten Aspekte von der Routenplanung über die Fahrweise bis hin zur Betriebsweise zu berücksichtigen und in einer allumfassenden Architektur einzubetten. Das Hauptergebnis dieses Entwurfsprozesses stellt eine funktionale Systemarchitektur dar, die die wesentlichen funktionalen Systemkomponenten, deren Struktur sowie die Schnittstellen beschreibt[11] und dabei den gegenwärtigen und zukünftigen funktionalen und nichtfunktionalen Anforderungen genügt. Insbesondere der Aspekt der Modifizierbarkeit bzw. Erweiterbarkeit spielt eine herausragende Rolle, wenn eine breite Anwendbarkeit der Architektur auch in Zukunft gewährleistet sein soll.

Im folgenden Abschnitt wird ein allgemeiner Überblick über das Thema Systemarchitekturen geben sowie im speziellen auf die Bedeutung einer funktionalen Referenzarchitektur eingegangen.

1.2 Architekturen

1.2.1 Begriffsdefinitionen

Der Begriff Systemarchitektur stellt eine Komposition der Begriffe System und Architektur dar. Um eine einheitliche Verwendung der Begriffe zu garantieren, ist eine Definition zweckmäßig. Nach Vogel ist der Begriff System wie folgt definiert:

> „Ein System ist eine Einheit, die aus miteinander interagierenden Software- und Hardware-Bausteinen besteht sowie zur Erfüllung eines fachlichen Ziels existiert. Es kommuniziert zur Erreichung seines Ziels mit seiner Umwelt und muss den durch die Umwelt vorgegebenen Rahmenbedingungen Rechnung tragen.“[12]

Der Begriff Architektur hingegen ist in seiner Bedeutung nicht näher festgelegt[13]. Angelehnt an die Softwareentwicklung ist eine Architektur dafür zuständig die Komponenten eines Systems definieren, dessen wesentliche extern sichtbare Merkmale zu beschreiben

[11] Korzenietz (2014): Eine generische Systemarchitektur zur energetischen Optimierung von Fahrzeugen mithilfe von Fahrerassistenzsystemen, S. 60

[12] Vogel et al. (2009): Software-Architektur, S. 46

[13] Vogel et al. (2009): Software-Architektur, S. 43

sowie die Beziehungen zwischen diesen Komponenten zu charakterisieren[14]. Zusammengefasst kann Systemarchitektur daher wie folgt definiert werden:

> „Die Systemarchitektur eines Systems beschreibt dessen Struktur respektive dessen Strukturen, dessen Bausteine (Software- und Hardware-Bausteine) sowie deren sichtbare Eigenschaften und Beziehungen sowohl zueinander als auch zu ihrer Umwelt.“[15]

Bass, Clements und Kazman definieren den Begriff Systemarchitektur ein wenig umfassender:

> „A system´s architecture is a representation of a system in which there is a mapping of functionality onto hardware and software components, a mapping of the software architecture onto the hardware architecture, and a concern for the human interaction with these components. That is, system architecture is concerned with a total system, including hardware, software, and humans”[16]

Laut dieser Definitionen beinhaltet die Systemarchitektur sowohl die eine Repräsentation der Funktionalitäten (functionalites) eines Systems, als auch die deren Verteilung auf Software und Hardware, was der Software- und Hardware-Architektur entspricht. Die Repräsentationen unterscheiden sich im Grad der Abstraktion des Systems. Die abstraktere Sicht wird hierbei durch die logische (auch funktionale) Systemarchitektur, repräsentiert, während sich die konkretere Sicht in der technischen Systemarchitektur wiederfindet[17]. Die logische Systemarchitektur kennzeichnet sich dadurch aus, dass sie noch keine Aussage über technische Realisierungsmöglichkeiten trifft. Im Fokus der logischen Systemarchitektur stehen die Funktionen bzw. das Funktionsnetzwerk des Systems samt Schnittstellen und Kommunikation. Durch sie wird somit definiert, was das System leisten wird, aber nicht, wie es konkret realisiert wird. Es entsteht sozusagen ein abstraktes, logisches Modell des Systems und seiner Funktionen[18]. Der Übergang von dieser lösungsneutralen Sicht hin zu technischen Umsetzungsmöglichkeiten manifestiert sich in der technischen Systemarchitektur. Darin wird festgehalten, wie die zuvor bestimmten Funktionen in Form von Hardware und Software realisiert werden können, d.h. beispielsweise welche Steuergeräte bestimmte Funktionen realisieren und mit welchem Bussystem diese miteinander verbunden sind.

---

[14] Starke (2014): Effektive Softwarearchitekturen, S. 14

[15] Vogel et al. (2009): Software-Architektur, S. 51

[16] Bass et al. (2012): Software Architecture in Practice, S. 7

[17] Schäuffele & Zurawka (2006): Automotive Software Engineering, S.17

[18] Schäuffele & Zurawka (2006): Automotive Software Engineering, S.152

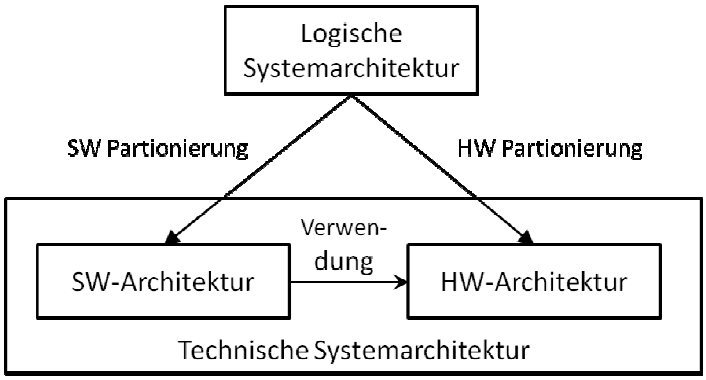

Abbildung 1-1: Hierarchie der logischen und technischen Systemarchitektur nach von der Beeck [19]

Bei der Beschreibung einer Architektur werden dabei verschiedene Sichten unterschieden[20]. Das V-Modell unterscheidet dabei allgemein bei Systemarchitekturen zwischen einer statischen und einer dynamischen Sicht[21]. Während die statische Sicht zur Beschreibung der Struktur eines Systems benutzt wird (Dekomposition)[22], beschreibt die dynamische Sicht das Verhalten sowie die Interaktionen an den Schnittstellen. Im Bereich der Software-Architekturen werden vergleichbare Sichten verwendet. Die wichtigen Sichten nach Starke sind[23]:

Kontextsicht: Zeigt das Umfeld eines Systems sowie dessen Zusammenhang mit seiner Umwelt.

Bausteinsicht: Zeigt die statische (interne) Struktur eines Systems sowie die Zusammenhänge zwischen den Bausteinen/Komponenten und deren Schnittstellen.

Laufzeitsicht: Beschreibt, welche Bestandteile des Systems zur Laufzeit existieren und wie diese (dynamisch) zusammenwirken.

Verteilungssicht: beschreibt die Ablaufumgebung des Systems in Form von Hardwarekomponenten und wie Softwarebausteine darauf verteilt werden.

Generell gilt für Architektursichten, dass sie durch die Interessenvertreter (Stakeholder) eines Systems motiviert werden. Dabei zeigt eine Sicht sinnvoller Weise auch nur die für bestimmte Interessenvertreter wichtigen Aspekte eines Systems[24].

---

[19] Von der Beeck (2006): Deployment of logical and technical architectures, S. 207

[20] Starke (2014), S. 15; Analog zu Gebäudearchitekturen, die ebenfalls unterschiedliche Sichten und Pläne aufweisen, wie Grundriss, Statik, Elektrik, etc.

[21] V-Modell XT: http://v-modell.iabg.de/v-modell-xt-html/1f9bf6946e4db6.html

[22] Damit ist das in seine Teilfunktionen zerlegte System gemeint

[23] Starke (2014): Effektive Softwarearchitekturen, S. 15

[24] Vogel et al. (2009): Software-Architektur, S. 84

Im Fokus dieser Arbeit liegt die logische/funktionale Systemarchitektur, die mittels Kontext-, Baustein- und Laufzeitsicht darstellt wird. Die technische Systemarchitektur mit einer Darstellung der Verteilungssicht wird nicht betrachtet.

1.2.2 Allgmeiner Zweck einer Architektur

Architekturen tragen dazu bei, ein komplexes System beherrschbar und verständlich zu machen, indem sie das Gesamtsystem in geordnete und übersichtliche Strukturen überführen und diese übersichtlich dokumentieren[25]. Dem Betrachter wird somit das Systemverständnis erleichtert, da das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten problembezogen abstrahiert dargestellt wird. Mit den verschiedenen Sichten tragen sie dazu bei, eine der Aufgabenstellung angemessene Informationsbereitstellung zu gewährleisten und somit die Kommunikation zwischen den Interessenvertretern zu erhöhen, um so ein gemeinsames Verständnis für ein System zu schaffen[26].

Eine Architektur wird dabei stets auch in einem Organisationskontext gesehen, der ihre Entwicklung maßgeblich beeinflusst. So können sich die Struktur des Unternehmens, die verfolgten Entwicklungsprozesse oder andere organisatorische Faktoren in der Systemarchitektur niederschlagen[27]. Umgekehrt kann eine Architektur aber auch genutzt werden, um die Arbeits- und Organisationsstruktur zu beeinflussen[28] und seinerseits den Entwicklungsprozess zu beeinflussen.

Nicht zuletzt wird mit einer Architektur bestimmt, ob ein System bestimmte Qualitätsattribute[29] aufweisen wird oder nicht[30]. Die bedeutendsten Qualitätsattribute im Kontext von Softwaresystem sind dabei nach Bass et al. Availablity (Verfügbarkeit), Interoperability (Interoperabilität), Modifiablity (Modifizierbarkeit), Performance (Leistungsfähigkeit) und Security (Sicherheit). Diese Qualitätsattribute eines Systems werden maßgeblich durch ein Architekturdesign gehemmt oder ermöglicht. Allerdings kann eine Architektur nicht alleine für die Qualität und Funktion eines Systems garantieren. Eine dürftige Implementierung kann ein adäquates Architekturdesign stets untergraben.

---

[25] Starke (2014): Effektive Softwarearchitekturen, S. 16

[26] Bass et al. (2012): Software Architecture in Practice, S. 29

[27] Starke (2014): Effektive Softwarearchitekturen, S. 29

[28] Bass et al. (2012): Software Architecture in Practice, S. 33

[29] Nach Bass et al. können Qualitätsattribute (Quality Attributes) als nichtfunktionale Attribute verstanden werden. Vgl. Bass et al. (2012): Software Architecture in Practice, S. 33

[30] Bass et al. (2012): Software Architecture in Practice, S. 26

1.2.3 Konzept einer universellen Systemarchitektur

Systemarchitekturen werden für gewöhnlich für Systeme mit einem (mehr oder minder) fest umrissenen Funktionsumfang entworfen. Auf Grundlage von funktionalen und nichtfunktionalen Anforderungen werden zunächst die logische/funktionale Systemarchitektur und dann die technische Systemarchitektur erstellt. Die technische Systemarchitektur dient dann als Grundlage für die Spezifikation der (Software-) Komponenten und deren anschließende Implementierung[31]. In solch einem idealen Systementwicklungsprozess entsteht eine geeignete Systemarchitektur „auf dem weißen Blatt Papier" allein auf Basis der Benutzeranforderungen. In der Praxis hat es sich jedoch bewährt für, bestimmte Entwicklungsfragen auf bereits etablierte Architekturvorlagen zuzugreifen. Referenzarchitekturen stellen ein solches Hilfsmittel dar. Auch zeigt die Praxis, dass sich die Anforderungen an ein System während seiner Nutzung ändern können, was eine Modifizierung des Systems nach sich kann. Im Folgenden werden die Begriffe Referenzarchitektur und Modifizierbarkeit näher erläutert und die Ansätze unter dem Begriff der universtellen Systemarchitektur zusammengebracht.

Referenzarchitektur

Als Ausgangspunkt für die Entwicklung von konkreten Systemarchitekturen für spezifische Anwendungsfälle können Referenzarchitekturen verwendet werden. Referenzarchitekturen repräsentieren Lösungen für allgemeine architektonische Anforderungen respektive Qualitäten[32]. Eine Referenzarchitektur kombiniert dabei allgemeines Architekturwissen und allgemeine Erfahrungen mit spezifischen Anforderungen zu einer architektonischen Gesamtlösung für einen bestimmten Problembereich. Die spezifischen Anforderungen beinhalten dabei die gewünschten Funktionalitäten eines Systems[33] und werden als Funktionsbausteine in einem sogenannten Referenzmodell festgehalten[34]. Ein Architekt bedient sich Referenzarchitekturen und überführt diese in konkrete, anwendungsspezifische Architekturen. Dabei übernimmt die Referenzarchitektur die Aufgabe wahr, die Funktionsbausteine auf Systembausteine zu verteilen. Eine Referenzarchitektur kann somit als Grundlage für eine zu entwickelnde Serien-Systemarchietektur dienen, indem die einzelnen funktionalen Anforderungen auf die Vorlage abgebildet, feiner ausgestaltet und diese schließlich umgesetzt werden. Vogel nennt u.a. die folgenden zwei Vorteile von Referenzarchitekturen:

---

[31] Schäuffele & Zurawka (2006): Automotive Software Engineering, S.145ff

[32] Vogel et al. (2009): Software-Architektur, S. 253

[33] Vogel et al. (2009): Software-Architektur, S. 254

[34] Vogel et al. (2009): Software-Architektur, S. 255

- „Eine Referenzarchitektur senkt das Risiko, eine nicht tragfähige Architektur zu entwerfen.
- Eine Referenzarchitektur senkt die Kosten des Architekturentwurfs, weil sie bereits wichtige Erkenntnisse aus dem Bereich der Problembereichsanalyse enthält und dadurch den Aufwand für diese Tätigkeit reduziert.“ [35]

Modifizierbarkeit

Der ursprüngliche Nutzungskontext und der funktionale Umfang eines Systems können sich im Laufe der Produktlebenszeit ändern, was eine Anpassung/Modifikation eines Systems erforderlich machen kann. Bass et al. unterscheiden in diesem Zusammenhang bei Softwarearchitekturen zwischen lokalen, nichtlokalen und architektonischen Änderungen[36]. Während lokale Änderungen lediglich die Modifikation einer Komponente erfordern, sind von nichtlokalen Änderungen gleichzeitig mehrere Komponenten betroffen. In beiden Fällen beleibt jedoch die grundlegende Architektur weiterhin bestehen. Sind jedoch tiefergehende Anpassungen notwendig, kann auch die grundlegende Architektur von Änderungen betroffen sein. Vor diesem Hintergrund erscheinen lokale Änderungen präferiert, da diese am einfachsten durchzuführen sind. Als effektive Architekturen im Hinblick auf Modifizierbarkeit werden somit diese bezeichnet, bei welchen die gebräuchlichsten Systemänderungen als lokale Änderungen einzelner Module dargestellt werden können[36].

Als Änderung können dabei das Hinzufügen von neuen Funktionalitäten sowie das Auswechseln und Entfernen von bestehenden Funktionen verstanden werden. Auch das Einbetten und Anpassen eines bestehenden Systems in ein neues Umfeld (beispielsweise durch Wechsel der zugrundeliegenden technischen Infrastruktur) wird als Änderung verstanden. Berücksichtigt eine Architektur das Qualitätsattribut Modifizierbarkeit nur unzureichend, d.h. werden die möglichen Änderungen und Ausprägungen eines Systems nicht bereits bei der Architekturgestaltung ausreichend berücksichtigt, besteht die Gefahr, dass nachträgliche Änderungen eines Systems nur mit erheblichem Aufwand dargestellt werden können. Das Ergebnis einer solchen Änderung wäre dann zwar ein funktional angepasstes System, jedoch hätte dies eine gesteigerte Komplexität der zugrundeliegenden Struktur zur Folge. Jede weitere nachträglich eingebrachte Änderung (insbesondere Erweiterung) würde die Komplexität noch weiter treiben. Als Analogie zur klassischen Architektur kann beispielsweise das Hinzufügen von zusätzlichen Räumen in ein bestehendes Gebäude benutzt werden. Ist das Gebäude für eine derartige Erweiterung nicht a priori vorgesehen, müssen unter Umständen nachträglich komplexe

[35] Vogel et al. (2009): Software-Architektur, S. 256

[36] Bass et al. (2012): Software Architecture in Practice, S. 27

Tragstrukturen, Neuinstallation, etc. errichtet werden, um die zusätzlichen „Balkone“ tragen zu können. Eine Abweichung von der ursprünglichen Architektur zwecks Erfüllung von stets neuen (unvorhergesehenen) Anforderungen kann dann soweit führen, dass sich ein System zu einem „undurchschaubaren Gebilde gemäß dem Muster Big Ball of Mud auch bekannt als „Kludge“[37], entwickelt. Eine Steigerung der Komplexität hat somit zur Folge, dass das Systemverständnis immer weiter sinkt und der Aufwand für Implementierung, Integration, Test und Wartung steigen.

Neben der Softwaredomäne leidet auch die Entwicklung von E/E[38]-Architekturen unter der steigenden Anzahl an Funktionen und folglich Steuergeräten. Die wachsende Komplexität in diesem Bereich führt dabei zu steigenden Kosten und einer erhöhten Fehleranfälligkeit[39], wenn dem nicht mittels architektonischer Überlegungen hinsichtlich Modifizierbarkeit entgegengewirkt wird.

Universelle Systemarchitektur

In dieser Arbeit beschreibt das Konzept einer universellen Systemarchitektur den Ansatz einer Referenzarchitektur mit Fokus auf Modifizierbarkeit. Mit dem Begriff der Universalität ist dabei eine breite Anwendbarkeit der Architektur gemeint, sowohl durch ihre Rolle als Architekturvorlage als auch mit der expliziten Betonung des Qualitätsattributs der Modifizierbarkeit. Es wird jedoch betont, dass die universelle Anwendbarkeit dabei auf einen bestimmten Anwendungsbereich beschränkt bleibt.

Für einen Nutzer der Systemarchitektur äußert sich der Nutzen die Universalität in zwei Aspekten:

- Für den betrachteten Problembereich steht eine einheitliche Referenzarchitektur zur Verfügung, die dabei hilft, spezifische Systemausprägungen effizient zu planen und zu realisieren.
- Durch die Fokussierung der Referenzarchitektur auf das Qualitätsattribut Modifizierbarkeit wird der Nutzer dahingehend unterstützt, dass sich Systeme, die auf der Referenzarchitektur basieren, im Nachhinein kosten- und zeiteffizient ändern lassen.

[37] Vogel et al. (2009): Software-Architektur, S. 4

[38] Elektrik/Elektronik

[39] Scheuch et al. (2012): Simplified Architecture by Use of Decision Units, S.121

1.3 Forschungsziele

Hauptziel der Arbeit ist die Entwicklung einer funktionalen Referenzarchitektur für den Anwendungsbereich der Assistenzsysteme zur energetischen Optimierung des Betriebs von Fahrzeugen. Die Haupteigenschaft der funktionalen Referenzarchitektur soll dabei ihre universelle Anwendbarkeit sein, was durch ein hohes Maß Modifizierbarkeit zum Ausdruck kommt. In ihrer Rolle als Referenz soll die Architektur als Entwicklungsgrundlage dienen, auf deren Basis sich konkrete, funktionsspezifische Architekturinstanzen entwerfen lassen sollen.

Das Hauptaugenmerk in der Architekturentwicklung gilt dabei dem Entwurf einer geeigneten Modulpartitionierung, der Strukturierung der Komponenten sowie der Definition von internen und externen Schnittstellen. Die Entwicklung Referenzarchitektur beschränkt sich auf die lösungsneutrale funktionale/logische Ebene. Eine Verteilung von funktionalen Komponenten auf Soft- und Hardware (technische Systemarchitektur) ist nicht mehr Gegenstand dieser Arbeit.

Die zentralen Fragestellungen, die im Rahmen der Arbeit beantwortet werden soll, lauten:

- Kann die funktionale Referenzarchitektur so gestaltet werden, dass Modifikationen in Form von Erweiterungen und Übertragungen als lokale oder nichtlokale Änderungen[40] dargestellt werden können oder gibt es Modifikationen, die eine architektonische Anpassung erfordern?
- Bis zu welchem Konkretisierungsgrad kann die funktionale Referenzarchitektur einheitlich beschrieben bzw. ab welchem Konkretisierungsgrad ist die Bildung von anwendungsspezifischen Instanzen erforderlich[41]?
- Kann der Anspruch der Architektur, im betrachteten Nutzungskontext universell anwendbar zu sein, validiert werden?
- Steht die Nutzung einer funktionalen Referenzarchitektur für Assistenzsysteme zur energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebs in Widerspruch zu anderen, im Automobilbereich relevanten Referenzarchitekturen[42]?

Dem Verfasser dieser Arbeit ist nicht bekannt, dass diese Fragestellungen bereits in anderen Forschungsarbeiten wissenschaftlich diskutiert wurden.

---

[40] vgl. Modifizierbarkeit, S. 8

[41] Gemäß dem Motto „so konkret wie möglich, so abstrakt wie nötig“

[42] Hier sind in erster Linie Architekturen für hochautomatisiertes Fahren relevant

1.4 Methodik und Aufbau der Arbeit

Als Ausgangpunkt die Erreichung der im vorangegangenen Kapitel genannten Ziele und zur Adressierung der Fragestellungen, wird zunächst der Stand der Technik und Forschung hinsichtlich dreier Aspekte betrachtet. Der erste Aspekt befasst sich mit der Frage, auf welche grundsätzliche Art und Weise der Fahrzeugbetrieb energetisch beeinflusst werden kann. Im zweiten Teil werden bisher bekannte Assistenzsysteme zur energetischen Optimierung betrachtet und nach Funktionen geordnet und im dritten Abschnitt werden identifizierte architektonische Überlegungen bewertet. Die Ergebnisse werden in Kapitel 2 zusammengefasst.

Mit Grundlage der Ergebnisse der Recherche werden anschließend Use Cases als Ausgangpunkt für die dem Top-Down-Ansatz folgende Entwicklung für die Systemarchitektur hergeleitet. Dabei werden neben den funktionsgetriebenen Use Cases, die aus Sicht eines Systemnutzers beschreiben, welche ökogische Assistenz darstellbar ist, auch entwicklungsgetriebene Use Cases betrachtet. Entwicklungsgetriebene Use Cases beschreiben aus der Perspektive des Entwicklers, wie die Nutzung als Referenzarchitektur aussehen kann und welche Modifikationen an einem System einfach und effizient durchführbar sein sollen. Die Use Cases bilden im Anschluss die Grundlage für die Definition von funktionalen und nichtfunktionalen Anforderungen. Nichtfunktionale Anforderungen entsprechen dabei Anforderungen hinsichtlich der zu erfüllenden Qualitätsattribute. Die Use Case-Betrachtung und die Ableitung der Anforderungen werden als Anforderungsanalyse in Kapitel 3 behandelt.

Im nächsten Schritt wird ausgehend von den Anforderungen die funktionale Referenzarchitektur schrittweise abgeleitet. Ausgangspunkt hierzu ist zunächst die Identifikation der notwendigen Optimierungsfunktionen, die für die Erfüllung der geforderten funktionalen Anforderungen erforderlich sind. Darauf aufbauend werden grundlegende Architekturschemata betrachtet, die sich als Grundlage für den Entwurf unterschiedlicher Varianten der funktionalen Grobarchitektur eigenen. Die Architekturschemata entstammen dabei dem Bereich der Kontrollarchitekturen für mobile Roboter, da in dieser Domäne bereits ein umfangreiches architektonisches Wissensrepertoire zur Verfügung steht. Nach der Bewertung unterschiedlicher Varianten erfolgen die Auswahl einer funktionalen Grobarchitektur und die anschließende Detaillierung der einzelnen Funktionsmodule. Als Ergebnis dieses Prozesses liegt der Entwurf für eine funktionale Referenzarchitektur für Assistenzsysteme zur energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebs vor. Die im Entwicklungsprozess getroffenen architektonischen Entscheidungen sowie die das Ergebnis werden in Kapitel 4 diskutiert und dokumentiert.

Im Rahmen der anschließenden Architekturbewertung wird die Eignung der entworfenen Systemarchitektur hinsichtlich ihres Referenzcharakters und der bereitzustellenden Modifizierbarkeit untersucht. Die Bewertung erfolgt anlehnt an die Methode der

szenariobasierten Architekturbewertung. Dabei wird untersucht, ob und in welchem Umfang die verfolgten Architekturansätze die Erfüllung von zuvor definierten Qualitätsszenarien unterstützen. Die Qualitätsszenarien stellen dabei Verfeinerungen der nichtfunktionalen Anforderungen dar. Abschließend werden die noch einmal die Erfüllung der gestellten Anforderungen sowie die zentralen Fragestellungen diskutiert. Dies ist Inhalt des Kapitels 5.

Zum Abschluss wird in Kapitel 6 wird ein Gesamtfazit zur Arbeit gezogen und ein Ausblick auf weitere offene Fragen im Bereich der Architekturentwicklung für Assistenzsysteme zur energetischen Optimierung gegeben.

2 Stand der Forschung und Technik

2.1 Begriffsdefinitionen

Vor dem Hintergrund der Thematik dieser Arbeit werden zunächst ein einfaches, an Gollnick[43] angelehntes Energieumsatzmodell eingeführt und grundlegende energetische Begriffe definiert.

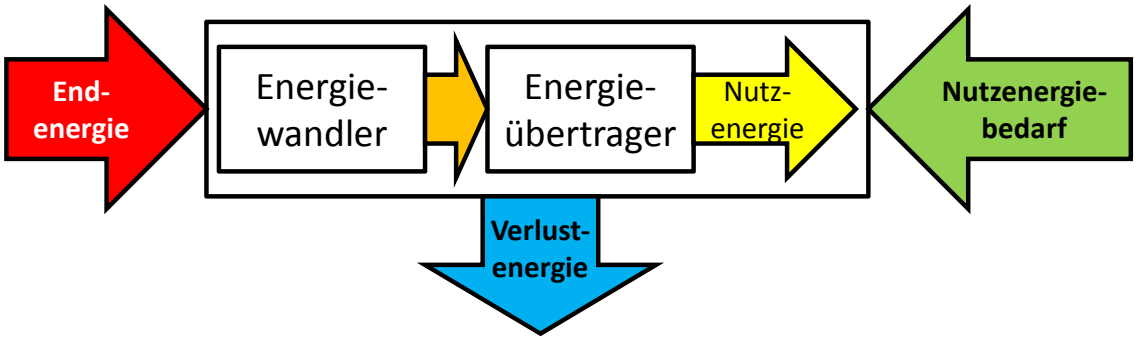

Abbildung 2-1: Vereinfachtes Energieumsatzmodell (angelehnt an Gollnick[43])

Das **Energieumsatzmodell** stellt den Zusammenhang zwischen Endenergie und dem Nutzenergiebedarf her. Es repräsentiert dabei den kompletten Antriebstrang mit den Energiewandlern (z. B. Verbrennungskraftmaschine), Kennungswandlern (z. B. Getriebe) und Energieübertragern.

Endenergie beschreibt die im Kraftstoff/in der Batterie gespeicherte chemische/elektrochemische Energie.

Nutzenergie beschreibt die nach der Energiewandlung, Kennungswandlung und Energieübertragung bereitstehende mechanische Energie an den Antriebsrädern und den Nebenaggregaten.

Nutzenergiebedarf fasst den Energiebedarf resultierend aus der der Überwindung der Fahrwiderstände und dem Energiebedarf der Nebenfunktionen zusammen.

Verlustenergie beschreibt die Energie, die während der Energie-/Kennungswandlung und dem Energietransport dissipiert wird.

[43] Gollnick (2004): Untersuchung zur Bewertung der Transporteffizienz versch. Verkehrsmittel, S. 108

2.2 Theoretische Grundlagen

Als Ausgangspunkt für die Analyse des Standes der Forschung und Technik hinsichtlich Funktionen und Systemen für die energetische Optimierung des Fahrzeugbetriebs werden die grundlegenden energierelevanten Wirkprinzipen im Fahrzeugbetrieb betrachtet. Der Fahrzeugbetrieb selbst wird dabei in dem Kontext Fahrer, Fahrzeug und Umwelt gesetzt. Hierfür wird zunächst eine geeignete Modellvorstellung eingeführt, die der Strukturierung und Darstellung des Fahrzeugbetriebs dient.

Auf Grundlage dieses Modells wird zunächst der Energieumsatz in Form der energetischen Wirkungskette im Fahrzeug erläutert. Anschließend wird der Einfluss des Fahrers auf den Energieumsatz analysiert und grundsätzliche Assistenzansätze zur energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebs beschrieben.

2.2.1 Fahrer-Fahrzeug-Umwelt-Modell

Ein etabliertes Modell zur Beschreibung der Interaktion zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umwelt ist das Drei-Ebenen-Modell nach Donges[44]. Diese Modellvorstellung ist geeignet, um Systeme und Funktionen zur Unterstützung des Fahrers bei der (energieeffizienten) Fahrzeugführung, wie sie im Stand der Technik betrachtet werden, zu klassifizieren.

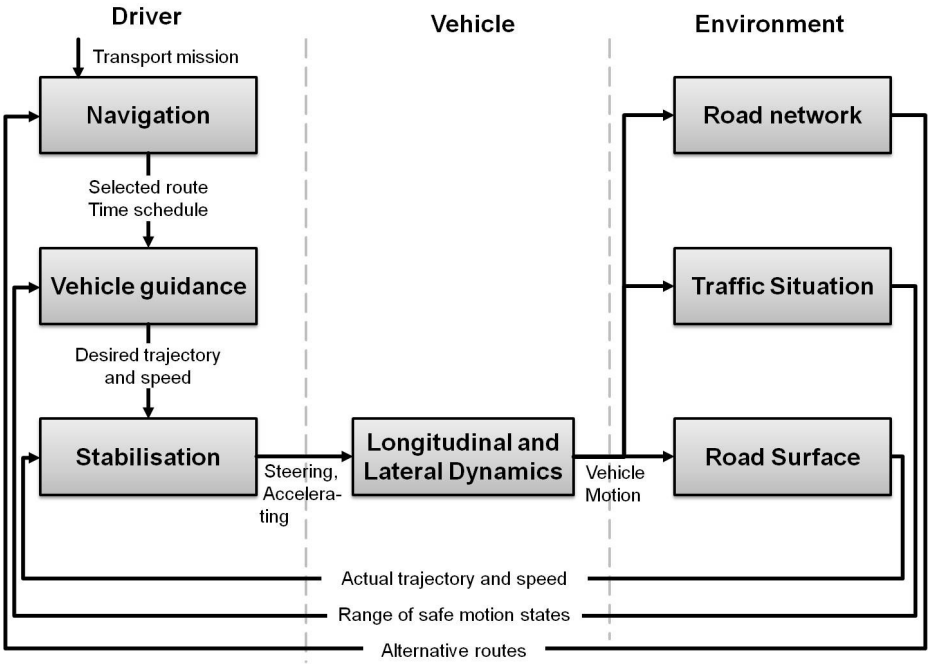

Abbildung 2-2: Drei-Ebenen-Modell nach Donges[44]

[44] Donges (1982): Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen, S. 183-190

Gemäß dieser Modellvorstellung kann die Fahrzeugführung durch drei kaskadierte Regelkreise dargestellt werden. Auf der höchsten Ebene (Navigationsebene) erfolgt die Planung und gegebenenfalls Anpassung der Route. Auf der darunter liegenden Ebene (Bahnführungsebene) wird die Umsetzung der Route in Form von Trajektorien (Sollspur und –geschwindigkeit) geplant. Diese bilden die Sollwerte für die Stabilisierungsaufgabe, die in der in der untersten Ebene (Stabilisierungsebene) angesiedelt ist. Die Stabilisierungsaufgabe besteht in der Minimierung der Abweichung zwischen Ist- und Soll-Trajektorie. In der konventionellen Fahrzeugführung erfolgt die Interkation zwischen Fahrer und Fahrzeug auf dieser Ebene. Entsprechend der durch die Ebenen festgelegten Granularität wird die Umwelt strukturiert in das Straßennetz, den Fahrraum (Straßen und Verkehr) und die Fahrbahnoberfläche. Als Erweiterung des Fahrzeugmodells nach Donges mit seiner Fokussierung auf Längs- und Querdynamik wird das Fahrzeugmodell um den Antriebsstrang mit seinen Komponenten erweitert. Im folgenden Abschnitt werden das Fahrzeug und die relevanten energetischen Wirkzusammenhänge analysiert.

2.2.2 Energetische Wirkkette im Fahrzeug

Nach dem Drei-Ebenen-Modell agiert der Fahrer als ein Regler, der die gewünschten Solltrajektorien in die Steuergrößen Fahr-/Bremspedalstellung und Lenkradwinkel übersetzt. Die Steuergrößen Fahr-/Bremspedalstellung werden anschließend durch den Antriebsstrang in Antriebsmomente umgesetzt und mit diesen Antriebsmomenten werden dann das Fahrzeug und die Nebenfunktionen in Bewegung gesetzt. Die während des Betriebs in Form von Fahrwiderständen auftretenden Störgrößen müssen dabei vom Fahrer durch eine Anpassung der Stellung der Fahr-/Bremspedale ausregelt werden.

Fahrwiderstände

Der Gesamtfahrwiderstand F_{W} setzt sich zusammen aus dem Radwiderstand $F_{\mathrm{W,R}}$, dem Luftwiderstand $F_{\mathrm{W,L}}$, dem Steigungswiderstand $F_{\mathrm{W,S}}$ und dem Beschleunigungswiderstand $F_{\mathrm{W,B}}$[45]:

$$F_{\mathrm{W}} = F_{\mathrm{W,R}} + F_{\mathrm{W,L}} + F_{\mathrm{W,S}} + F_{\mathrm{W,B}} \tag{2.1}$$

Der **Radwiderstand $\boldsymbol{F_{\mathrm{W,R}}}$** besteht im Wesentlichen aus dem Rollwiderstand der Reifen, dem Fahrbahnwiderstand (hauptsächlich resultierend aus Schwallwiderstand, Verformungswiderstand bei nachgiebiger Fahrbahn und Reibwiderstand im Feder-Dämpfer-System) sowie dem den Vorspur- und Kurvenwiderstand. Unter der Annahme einer

[45] Mitschke et al. (2014): Dynamik der Kraftfahrzeuge, S. 77

Geradeausfahrt auf trockener Straße ist der Rollwiderstand die dominierende Komponente[46] und der Radwiderstand wird berechnet mit

$$F_{\mathrm{W,R}} = f_{\mathrm{R}} \cdot F_{\mathrm{N,Fzg}} \tag{2.2}$$

$F_{\mathrm{N,Fzg}}$ bezeichnet dabei die Normalkraft des gesamten Fahrzeuges und $f_R$den Rollwiderstandsbeiwert.

Der **Luftwiderstand $F_{\mathrm{W,L}}$** resultiert aus Summe von Form- oder Druckwiderstand, Oberflächenwiderstand und Durchströmwiderstand. Er verhält sich proportional zum Quadrat der relativen Anströmgeschwindigkeit v_{rel}, der Luftdichte ρ_{L}, der Stirnfläche A sowie Luftwiderstandsbeiwert c_{x}:

$$F_{\mathrm{W,L}} = c_{\mathrm{x}} \cdot A \cdot \frac{\rho_{\mathrm{L}}}{2} \cdot v_{\mathrm{rel}}^2 \tag{2.3}$$

Im Fall von Windstille gilt $v_{\mathrm{Fzg}} = v_{\mathrm{rel}}$ und es kommt der Luftwiderstandsbeiwert bei frontaler Anströmung c_{w} zur Anwendung.

Der **Steigungswiderstand $F_{\mathrm{W,S}}$** ergibt sich aufgrund der Gesamtgewichtskraft von Fahrzeug und Beladung $m \cdot g$ in Abhängigkeit vom Steigungswinkel β:

$$F_{\mathrm{W,S}} = m \cdot g \cdot \sin\beta \tag{2.4}$$

Der **Beschleunigungswiderstand $F_{\mathrm{W,B}}$** ist der zu überwindende Widerstand bei resultierend aus der translatorischen Beschleunigung der Fahrzeugmasse m und der rotatorischen Beschleunigung der der rotierenden Komponenten des Antriebsstrangs (inklusive Reifen, Räder und Bremsen). Die rotatorische Massenträgheit der Antriebsstrangkomponenten wird durch den getriebeübersetzungsabhängigen Drehmassenzuschlagsfaktor $\varepsilon(i_{\mathrm{G}})$ als Anteil der Fahrzeugmasse m berücksichtigt[47]. Der Beschleunigungswiderstand berechnet sich mit der translatorischen Beschleunigung a_{Fzg} zu

$$F_{\mathrm{W,B}} = m \cdot (1 + \varepsilon(i_{\mathrm{G}})) \cdot a_{\mathrm{Fzg}} \tag{2.5}$$

Energieflusschema und Betriebszustände

Aus den Fahrwiderständen (und Nebenfunktionen) resultiert ein Nutzleistungsbedarf, der durch den Antriebsstrang gedeckt werden muss. Zusammen betrachtet mit dem Fahrzeug und den weiteren Energiespeichern (Tank, Batterien) ergibt sich ein Energiefluss zwischen diesen Komponenten. Das Energieflussschema in Abbildung 2-3 zeigt

[46] Mitschke et al. (2014): Dynamik der Kraftfahrzeuge, S. 19

[47] Haken (2011): Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik, S. 158

die energetische Struktur für einen allgemeinen Antriebsstrang bestehend aus einem verbrennungsmotorischen und ein elektrischen Zweig.

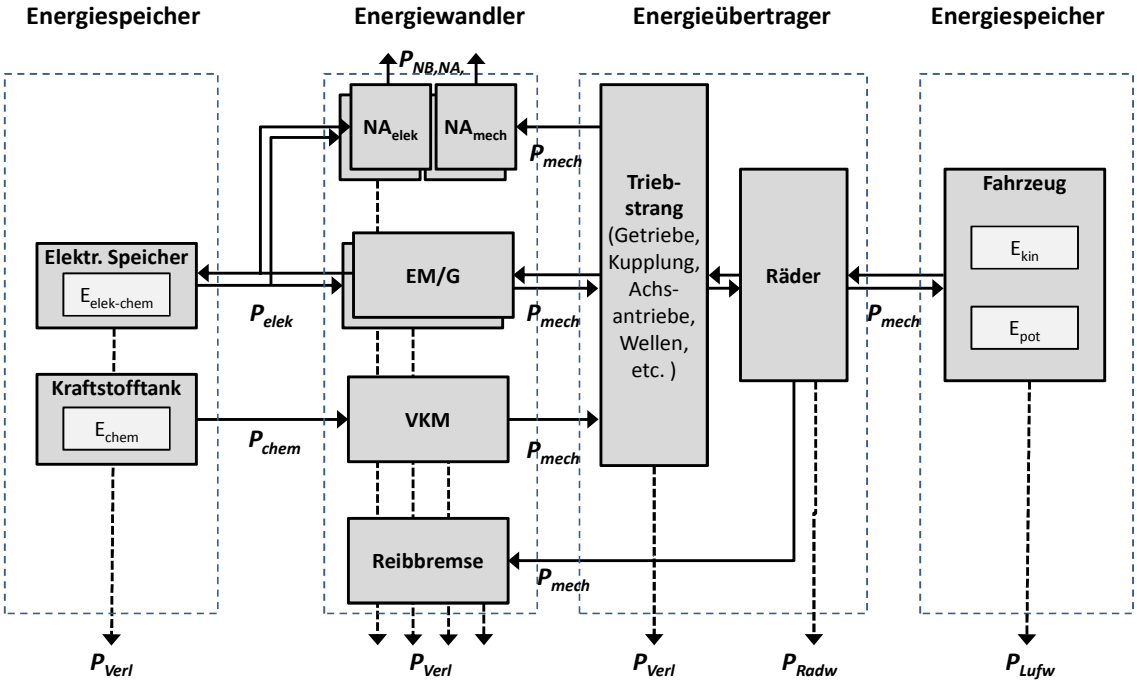

Abbildung 2-3: Energieflussschema für einen allg. Antriebsstrang[48]

Elektrischer Speicher und Kraftstofftank stellen die Energiespeicher dar, aus denen die Endenergie für die Energieumsetzung bezogen wird. Im elektrischen Zweig ist dabei ein bidirektionaler Energiefluss vorgesehen, sodass es möglich ist, den elektrischen Energiespeicher wieder zu befüllen. Die Verbrennungskraftmaschine (VKM), die Elektromotoren (EM)/Generatoren (G), die Nebenaggregate (NA) sowie die Reibbremse bilden die Energiewandler ab, die die verschiedenen Energieformen ineinander überführen bzw. im Falle der Reibbremse als Wärme dissipieren. Energieübertrager und Kennungswandler werden durch die Komponenten Triebstrang und Räder dargestellt. Ihre Aufgabe besteht darin die mechanische Energie zwischen der VKM, den EM/G und dem Fahrzeug zu übertragen und Arbeitspunkte anzupassen. Das Fahrzeug selbst stellt wiederum einen Speicher für kinetische und potentielle Energie dar, der geleert und gefüllt werden kann.

Sowohl die Energiewandlungs- als auch Energieübertagungsprozesse werden als verlustbehaftet betrachtet, was durch den Verlustenergiefluss dargestellt wird. Beschrieben werden kann das Verlustverhalten mittels arbeitspunktabhängiger Wirkungsgradkennfelder. Auch am Fahrzeug selbst entstehen Energieverluste bedingt durch den dissipativen Fahrwiderstandsanteil Luftwiderstand. Die Energieflüsse zur Überwindung des

[48] Eigene Darstellung

Steigungs- und Beschleunigungswiderstandes hingegen sind nicht dissipativ und werden als potentielle und kinetische Energie gespeichert.

Die oben dargestellte allgemeine Form des Energieflussschemas bildet gleichzeitig die Gruppe der (elektro)hybriden Antriebsstränge ab. Daraus lassen sich sowohl rein verbrennungsmotorische (konventionelle) Antriebsstränge als auch rein elektrische Antriebsstränge durch Anpassung/Eliminierung des elektrischen bzw. verbrennungsmotorischen Zweiges ableiten.

Der **hybride Antriebsstrang** erlaubt durch das Vorhandensein von jeweils zwei Energiespeichern und Energiewandlern den Fahrbetrieb elektrisch, verbrennungsmotorisch oder kombiniert zu gestalten. Zusätzlich ergibt sich die Möglichkeit der Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie sowie die Speicherung der elektrischen Energie.

Daraus abgeleitet sind folgende Betriebszustände bei parallelen oder leistungsverzweigten Hybridkonzepten grundsätzlich möglich[49]:

- **Reiner VKM-Betrieb**: Der Fahrantrieb erfolgt ausschließlich über die VKM.
- **Reiner E-Betrieb**: Der Antrieb erfolgt bei stehender VKM nur über die EM. Beim Segeln wird auch über die EM kein Moment aufgebracht, d. h. das Fahrzeug rollt ohne Antriebsenergie.
- **Boosten**: Die EM unterstützt die VKM beim Antrieb.
- **Lastpunktanhebung (LPA) bei Fahrt**: Die von der VKM erzeugte mechanische Energie wird sowohl zum Antrieb des Fahrzeugs als auch zur Stromerzeugung über die EM eingesetzt.
- **Rekuperation (regenratives Bremsen)**: Über den generatorischen Betrieb der EM wird das Fahrzeug gebremst und elektrische Energie erzeugt.
- **Verzögerung mittels Reibbremse**: Reicht die Verzögerung durch Rekuperation nicht aus, kann zusätzlich mittels Reibbremse potentielle und kinetische Energie als Wärme abgebaut werden.

Bei seriellen Hybridkonzepten erfolgt der Antrieb immer elektrisch, da eine mechanische Kopplung zwischen VKM und Abtrieb nicht vorgesehen ist. Im Grunde entspricht ein serielles Hybridkonzept einem elektrischen Antriebsstrang, dessen elektrischer Leistungsbedarf durch eine Kombination als VKM/G und elektrischem Speicher gedeckt wird. Dadurch ergeben sich einige Unterschiede zu den beschriebenen Betriebszuständen. Grundsätzlicher Vorteil der seriellen Hybriden ist, dass die VKM in einem einzigen oder einigen wenigen Betriebspunkten mit hohem Wirkungsgrad betrieben

[49] Hofmann (2010): Hybridfahrzeuge, S. 208

werden kann. Gleichzeitig entstehen jedoch Verluste durch die mehrfache Energiewandlung und Leistungsübertragung durch den Antriebsstrang.

Für den rein **verbrennungsmotorischen Antriebstrang** ergeben sich die folgenden Betriebszustände:

- **Reiner VKM-Betrieb**: Der Fahrantrieb erfolgt ausschließlich über die VKM. Der Antrieb einiger NA kann bedarfsorientiert (z. B. Kältemittelverdichter bei ausgeschalteter Klimaanlage) bzw. situationsgerecht (z. B. Generator bei Beschleunigungsmanövern) unterbrochen werden.
- **Schubbetrieb**: Das Fahrzeug rollt und schleppt die VKM und NA mit. Über den mitlaufenden Generator wird Energie in den elektrischen Speicher zurückgespeist. Der Kraftstoffffluss ist unterbrochen.
- **Segelbetrieb**: Das Fahrzeug rollt mit geöffneter Kupplung. Elektrisch angetriebene NA können aus dem elektrischen Speicher gespeist werden. Für den Betrieb von mechanisch angetriebenen NA ist ein verbrauchsbehafteter VKM-Betrieb erforderlich.
- **Verzögerung mittels Reibbremse**: Reicht die Verzögerung durch Segel- oder Schubbetrieb nicht aus, kann zusätzlich mittels Reibbremse potentielle und kinetische Energie als Wärme abgebaut werden.

Im rein **elektrischen Antriebsstrang** stehen abgeleitet aus dem hybriden Antriebsstrang die Betriebszustände reiner E-Betrieb, Rekuperation, Verzögerung mittels Reibbremse und Segelbetrieb zu Verfügung. Falls keine Trennkupplung zwischen Antriebsstrang und Fahrzeug vorhanden ist, muss im Segelbetrieb die EM momentenfrei mitlaufen

Freiheitsgrade im Antriebsstrang

Je nach Antriebstrang können unterschiedliche Möglichkeiten für die Beeinflussung von Energieströmen genutzt werden können. Zur Steuerung der Energieströme stehen dabei mehrere Freiheitsgrade zur Verfügung, die den Domänen Antriebsstrang, thermische Nebenfunktionen und elektrische Nebenfunktionen zugeordnet werden können[50]. Mit thermischen Nebenfunktionen sind in erster Linie die Klimatisierung des Fahrgastraumes und der Antriebsstrangkomponenten gemeint, wie die Kühlung der VKM oder Temperierung der Batterien. Die Hauptfreiheitsgrade sind dabei die Wunschtemperatur, die Aktivierungszeiten, Luftfeuchte, etc. bzw. daraus abgleitet die Zustände von Kühlmittelpumpen, Ventilen, Ventilatoren oder Kältemittelkompressoren. Im Bereich der

[50] Radke et al. (2014): Connected Energy-Based Powertrain Control, S. 1402-1404

elektrischen Nebenfunktionen, wie beispielsweise der Beleuchtungsanlage oder der Entertainmentsystems, bestehen die Freiheitsgrade in der Wahl des Aktivierungszustandes (an/aus) bzw. des Intensität (Level) der Nebenfunktionen. Die genannten Freiheitsgrade sind jedoch eingeschränkt durch Komfort-, Sicherheits- und Betriebsanforderungen, wie beispielsweise einer konstanten Fahrgastraumtemperatur, der Sicherstellung von guten Sichtverhältnissen bei Dunkelheit oder der Temperaturkonditionierung von Bauteilen zwecks Bauteilschutz und Emissionen. Das energetische Optimierungspotential ist in diesen Fällen daher eingeschränkt, wenngleich auch hier durch geeignete Maßnahmen, wie eine vorrausschauende Betriebsstrategie, die Energieeffizienz erhöht werden kann.

Die Freiheitsgrade mit der größten Bedeutung im Sinne der Energieeffizienz liegen stattdessen im Antriebsstrangstrang bzw. der Bereitstellung von Energie für den Fahrzeugantrieb. Die zwei wesentlichen und im Folgenden betrachteten Freiheitsgrade sind zum einen die Leistungsverteilung zwischen verbrennungsmotorischem und elektrischem Zweig und zum andern die Betriebspunktfestlegungen der entsprechenden Aggregate mittels Getrieben und Kupplungen.

Im Falle von elektrifizierten Antriebssträngen besteht ein Freiheitsgrad in der **freien Leistungsverteilung zwischen verbrennungsmotorischem und elektrischem Zweig**. Über diese Verteilung wird festgelegt, zu welchen Anteilen die die einzelnen Zweige dazu beitragen, die Ausgangsleitung bereitzustellen:

$$P_{\text{Ausgang}} = P_{\text{VKM}} + P_{\text{elek}} \tag{2.6}$$

Zu beachten ist, dass der elektrische Zweig sowohl einen positiven als auch einen negativen Beitrag leisten kann[51]. Im positiven Fall entspricht das den Betriebszuständen Boosten ($P_{\text{VKM}} > 0$) oder reiner E-Betrieb ($P_{\text{VKM}} = 0$), während der negative Fall den Betriebszuständen LPA ($P_{\text{VKM}} > 0$) und Rekuperation ($P_{\text{VKM}} = 0$) gleichkommt. Ist die elektrische Leistung gleich null, entspricht das dem reinen verbrennungsmotorischen Betrieb.

Gelegentlich wird der Aktivierungszustand der VKM (d.h. VKM an/aus) als eigener Freiheitsgrad aufgefasst, wenn die Betriebsmodi Start-Stopp, reines E-Fahren oder Segelbetrieb mit ausgeschalteter VKM vorgesehen werden. Die Definition als eigener Freiheitsgrad resultiert aus der Anforderung, dass die VKM auch bei nicht vorhandenem Antriebs- und NA-Leistungsbedarf betrieben werden kann. Relevant ist dies, um die VKM konditionieren zu können, um beispielsweise Emissionsgrenzwerte einhalten zu können.

[51] Auch der verbrennungsmotorische Zweig kann einen negativen Beitrag leisten, kann jedoch nicht als Speicher dienen.

Der andere Freiheitsgrad liegt in der **Bestimmung von Betriebspunkten durch Wahl einer Getriebeübersetzung** inklusive der Möglichkeit den Triebstrang komplett mittels einer oder mehrerer Kupplungen zu entkoppeln. Über die Getriebeübersetzung wird für einen gegebenen Leistungsbedarf ein Motorbetriebspunkt bestehend aus Motormoment und Motordrehzahl bestimmt. So wird es ermöglicht, stets die Motorbetriebspunkte mit dem günstigsten spezifischen Kraftstoffverbrauch auszuwählen. Während bei Stufengetrieben die Anzahl an Arbeitspunkten endlich ist, bieten stufenlose Getriebe (CVT = Continuous Variable Transmission) die Möglichkeit durchgehende Motorbetriebslinien mit unbegrenzt vielen Arbeitspunkten bereitzustellen.

Im Grunde steht durch die Entscheidungsmöglichkeit, kinetische und potentielle Energie zu rekuperieren oder durch die Reibbremse zu dissipieren, ein weiterer Freiheitsgrad zur Verfügung. Aus energetischer Hinsicht erscheint es jedoch erstrebenswert stets erst die volle Leistungsfähigkeit des Rekuperationssystemes auszunutzen und erst bei Erreichen der Leistungsgrenzen auf die Reibbremse zuzugreifen. Aus diesem Grunde wird dies nicht als eigener Freiheitsgrad betrachtet.

Für einen exemplarischen Parallelhybriden mit zwei Kupplungen ergeben sich daher die folgenden Freiheitsgrade[52], durch die die Energieflüsse im Antriebsstrang gesteuert bzw. beeinflusst werden können (Abbildung 2-4):

- Drehmomentenverteilung bzw. Drehmoment der EM oder VKM bei gegebenem Gesamtmomentenbedarf
- Zustand der VKM (an/aus)
- Zustand der Kupplungen (geschlossen/geöffnet)
- Getriebeübersetzung

[52] Radke et al. (2014): Connected Energy-Based Powertrain Control for Various Hybrid Vehicle Topologies

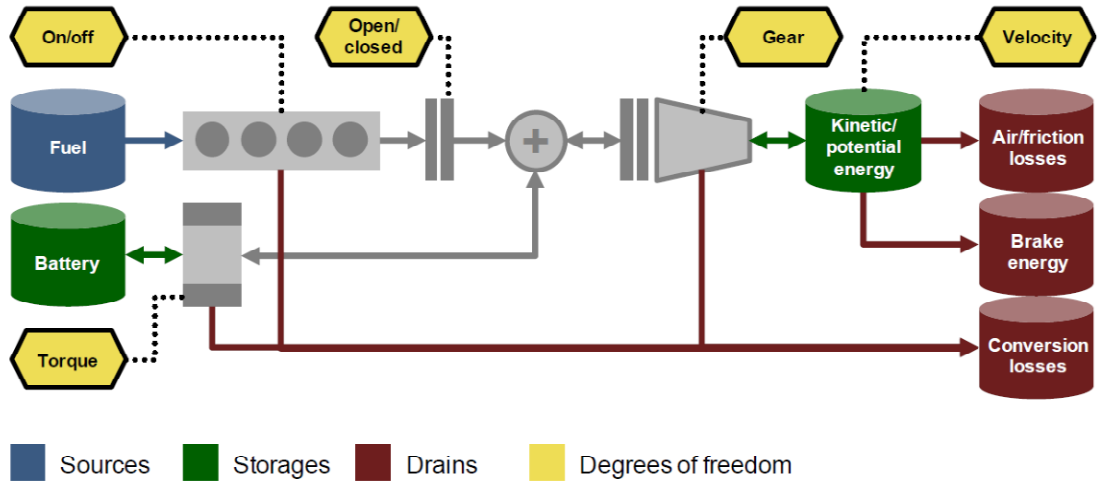

Abbildung 2-4: Freiheitsgrade eines Parallelhybriden mit zwei Kupplungen[53]

Es sei angemerkt, dass hier als Freiheitsgrad direkt das Drehmoment der EM aufgeführt wird. Zusammen mit der Drehzahl, die sich aus der Getriebeübersetzung (bzw. der Gangstufe) ergibt, resultiert die abgegebene Leistung.

Die Betriebspunktwahl stellte ein komplexes Optimierungsproblem dar, dessen Lösung wichtige Fahrzeugeigenschaften direkt beeinflusst[54]. Kraftstoffverbrauch, Ansprechverhalten, Komfort, Emissionierung oder Lebensdauer der Komponenten hängen direkt von der Nutzung der Freiheitsgrade ab.

Tabelle 2-1 fasst die Antriebsstrangfreiheitsgrade für die betrachteten Antriebsstrangtopologien zusammen:

Tabelle 2-1: Innere Freiheitsgrade für unterschiedliche Antriebsstrangtopologien

Antriebsstrang	**Innere Freiheitsgrade**
Verbrennungs-motorisch	• Triebstrangzustand (Getriebeübersetzung + Kupplungszustand)
Elektrisch	• (Triebstrangzustand (Getriebeübersetzung + Kupplungszustand))[55]
Hybrid	• Triebstrangzustand (Getriebeübersetzung + Kupplungszustand) • Leistungsverteilung zwischen VKM und EM

[53] Entnommen aus Radke et al. (2014): Connected Energy-Based Powertrain Control for Various Hybrid Vehicle Topologies, S. 1404

[54] Von Grundherr zu Altenthan und Weiyherhaus (2010): Ableitung einer heuristischen Betriebsstrategie für ein Hybridfahrzeug aus einer Online-Optimierung, S. 6

[55] Je nach Antriebsstrangauslegung benötigen Elektrofahrzeuge kein Getriebe, d.h. dieser Freiheitsgrad ist nur optional

Die beschriebenen Freiheitsgrade werden im Folgenden als **innere Freiheitsgrade** bezeichnet, da sie innerhalb des Fahrzeuges bzw. durch den Antriebstrang adressiert werden. Sie stellen die Freiheitsgrade dar, mit denen eine Nutzleistungsbereitstellung gesteuert werden kann. Im Gegensatz dazu steht der Nutzleistungsbedarf, der durch **äußere Freiheitsgrade** mitbestimmt wird (vgl. nächster Abschnitt). Veranschaulicht werden kann dieses Verhältnis beispielsweise anhand eines festen Fahrprofils, wie dem NEFZ[56] (Neuer Europäischer Fahrzyklus). Der Fahrzyklus gibt ein Geschwindigkeits-Zeit-Profil vor, dass ein Fahrzeug zu durchfahren hat. Unter der Annahme eines identischen Fahrzeuges (Masse, Stirnfläche, Widerstandsbeiwerte, Antriebsstrang etc.) ist der hieraus resultierende Nutzleistungsbedarf stets gleich. Wie dieser Nutzleistungsbedarf durch den Antriebsstrang gedeckt wird, ist hingegen nicht festgelegt und kann beeinflusst werden durch die Nutzung der inneren Freiheitsgrade[57]. Wie die Freiheitsgrade genutzt werden, wird dabei durch die Betriebsstrategie festgelegt, die neben der primären Erfüllung der Fahrvorgaben auch Ziele, wie minimalen Kraftstoffverbrauch und Emissionen oder Komfortwünsche, verfolgt, unter Berücksichtigung diverser Bedingungen, wie die Einhaltung von Lebensdauervorgaben der Batterie[58].

Leistungsübertagung durch den Antriebsstrang

Die Leistungsübertragung durch den Antriebsstrang ist verlustbehaftet und kann mittels verschiedener, betriebspunktabhängiger Wirkungsgrade beschrieben werden.

Der Antriebsstrangwirkungsgrad η_{Ant} stellt den Gesamtwirkungsgrad des kompletten Antriebsstranges bestehend aus Energiewandlern, Kennungswandlern und Energieübertragern dar. Mit diesem Wirkungsgrad wird der Zusammenhang zwischen der bereitzustellenden Nutzleistung zum Antrieb des Fahrzeuges $P_{\mathrm{Nutz,Ant}}$ und der einzusetzenden Endleistung P_{End} beschrieben:

$$\eta_{\mathrm{Ant}} = \frac{P_{\mathrm{Nutz,Ant}}}{P_{\mathrm{End}}} = \eta_{\mathrm{EW}} \cdot \eta_{\mathrm{Tr}} \tag{2.7}$$

Der Gesamtwirkungsgrad setzt sich aus dem zusammengefassten Wirkungsgrad sämtlicher Energiewandler η_{EW} und dem Wirkungsgrad des Triebstranges η_{Tr} zusammen. Unter dem Begriff Triebstrang werden sämtliche Kennungswandler und Energieübertrager (d.h. Getriebe, Kupplungen, Differentiale, Wellen, etc.) zusammengefasst.

---

[56] Rohde-Brandenburger (2014): Verbrauch in Fahrzyklen und im Realverkehr, S. 243

[57] Für Fahrzeuge mit Handschaltgetrieben gilt im NEFZ eine starre Schaltvorschrift. Fahrzeuge mit automatisierten Getrieben sind jedoch in der Fahrstufe „D“ zu betreiben, sodass die die herstellerspezifischen Schaltstrategien zum Tragen kommen.

[58] Hofmann (2010): Hybridfahrzeuge, S. 207

2.2.3 Energetischer Einfluss des Fahrers

Die Gestaltung bzw. Auslegung des Antriebsstranges und des Gesamtfahrzeuges sowie die Betriebsstrategie wirken sich auf den Endenergieaufwand (z. B. Kraftstoffmenge) aus. Den maßgeblichen Einflussfaktor auf den Endenergieaufwand stellt jedoch das Verhalten des Fahrers dar[59] [60]. Über sein Verhalten auf den Ebenen der Navigation, Bahnführung und Stabilisierung wird maßgeblich den Nutzenergiebedarf festgelegt. Im Folgenden werden die Einflussmöglichkeiten auf diesen drei Ebenen näher betrachtet.

Auf **Navigationsebene** stellen die Planung der Fahrt und die Wahl der Route die Haupteinflussgrößen für den Energiebedarf dar[61]. Über die Routenplanung und -wahl werden in erster Linie die Routenlänge und das zu überwindende Höhenprofil festgelegt, die direkt in den Energiebedarf einer Transportmission einfließen. Aber auch indirekt wirken sich Fahrtenplanung und Routenwahl auf den Energiebedarf aus, denn das zu erwartende (tageszeitabhängige) Verkehrsgeschehen[62] sowie die Verkehrsregelung entlang einer Route beeinflussen das Fahrverhalten auf Bahnführungsebene und somit den Energiebedarf. Die Planung, Wahl und dynamische Anpassung einer Route nach dem Kriterium des geringsten Energieverbrauchs stellt eine komplexe Aufgabe dar, die durch die äußeren Randbedingungen bedingt ist. So muss der Fahrer neben der Streckentopographie auch die Verkehrsregelung, die Witterung und das Verkehrsaufkommen entlang einer möglichen Route bei der Planung erfassen bzw. prognostizieren.

Neben der Möglichkeit über die Orts- und Zeitfestlegung einer Route, beeinflusst der Fahrer den Energiebedarf für die Bewältigung einer Transportaufgabe in erster Linie über die Fahr- und Betriebsweise[61]. Die **Fahrweise** beschreibt dabei die Fahrzeugführung abhängig vom Straßenverlauf und dem Straßenzustand sowie von anderen Verkehrsteilnehmern und der Straßenverkehrsordnung. Repräsentiert wird die Fahrweise als eine gewünschte raumzeitliche Trajektorie, die gleichbedeutend ist mit einem bestimmten Geschwindigkeits- und Kursprofil. Die Umsetzung dieser vom Fahrer gewünschten Fahrprofile erfolgt primär mittels Fahr-/Bremspedal sowie dem Lenkrad und wird als **Betriebsweise** bezeichnet. Weitere Bestandteile der Betriebsweise sind nach Neunzig[61] die Gangwahl sowie die Betätigung von Nebenfunktionen wie Klimatisierung, Scheibenwischer oder auch Beleuchtung. Der Prozess der Wahl einer Route, der Bestimmung einer geeigneten Trajektorien und deren direkter Umsetzung mittels Fahr-/Bremspedal

[59] Neunzig (2003): Fahrerassistenzsysteme zur Verbrauchsminderung von Kraftfahrzeugen, S. 20

[60] Dorrer (2004): Effizienzbestimmung von Fahrweisen und Fahrerassistenz zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauches unter Nutzung telematischer Informationen, S. 35

[61] Neunzig (2003): Fahrerassistenzsysteme zur Verbrauchsminderung von Kraftfahrzeugen, S. 21

[62] Das Verkehrsgeschehen hängt dem Abfahrtszeitpunkt ab. Wie Planung eines passenden Abfahrtszeitpunktes ist somit ebenfalls Bestandteil der Planung einer Fahrt.

und Lenkrad wird nach Bubb[63] auch als primäre Fahraufgabe bezeichnet. Die Bedienung von Getrieben, von Fahrtrichtungsanzeigern oder Fahrerassistenzsystemen werden hingegen als sekundäre Fahraufgabe zusammengefasst. Diese Aufgaben müssen während des Fahrzeugbetriebs ausgeführt werden, sind jedoch nicht dafür entscheidend, ein Fahrzeug auf der Straße zu halten. Aufgaben, die für Ausführung der Fahraufgabe nicht relevant sind, jedoch dem Komfort und Entertainment dienen, werden als tertiäre Aufgaben bezeichnet. Hierzu zählen die unter anderen die Bedienung der Klimatisierung sowie des Autoradios.

Aus energetischer Sichtweise legt der Fahrer durch die Fahrweise (d.h. die Wahl einer Trajektorie) fest, wie viel Leistung durch den Antrieb bereitgestellt werden muss, um das zugrundeliegende Fahrzeug zu bewegen. Grundsätzlich gilt, dass Fahrprofile mit höheren Geschwindigkeiten in einem höheren Energiebedarf resultieren verglichen zu Profilen mit moderarten Geschwindigkeiten bedingt durch überproportional zunehmende Fahrwiderstände. Neben der Geschwindigkeitswahl für die Konstantfahrt beeinflusst der Fahrer über sein Geschwindigkeitsänderungsverhalten maßgeblich den Energiefluss. Grundsätzlich bewirken hohe Geschwindigkeitsänderungen dabei einen hohen Energiefluss, sowohl beim Beschleunigen als auch beim Verzögern. Während beim Beschleunigen die zugeführte Leistung als kinetische Energie im Fahrzeug gespeichert wird, besteht beim Verzögern das Problem, dass die investierte kinetische Energie nicht wieder verlustfrei durch den Antriebsstrang rekuperiert werden kann. Bei nicht vorhandenem Rekuperationssystem muss die Energie im schlechtesten Fall komplett als Wärme durch die Reibbremse dissipiert werden. Die energieeffizienteste Strategie zum Verzögern stellt das Segeln dar, da in diesem Fall die kinetische Energie ohne zusätzliche Wandlungsverluste zur Überwindung von Luft- und Rollwiderstand genutzt wird. Dies wird auch als natürlich Rekuperation[64] bezeichnet. Vor diesem Hintergrund kann geschlussfolgert werden, dass es keinen generell optimalen Betriebspunkt des Motors gibt, der allgemein für die Beschleunigung des Fahrzeugs zu niedrigsten Verbräuchen führt, sondern dass der Bestpunkt davon abhängt, wie das Fahrzeug in der Folge verzögert wird[65]. Am effizientesten ist es, wenn die investierte kinetische Energie möglichst komplett in Form von Segeln genutzt werden kann. Muss jedoch häufiger und stärker gebremst werden, was die kinetische Energie weniger effizient in Strecke wandelt, dann ist die Investition weniger lohnenswert und dementsprechend sollte zur Effizienzoptimierung weniger stark beschleunigt werden.

Über die Betriebsweise hat der Fahrer zwei Möglichkeiten den Fahrzeugbetrieb energetisch zu beeinflussen. Als erstes besteht über die Bedienung von Kennungswandlern

[63] Bubb (2002): Der Fahrprozess – Informationsverarbeitung durch den Fahrer, S. 22-33

[64] Rohde-Brandenburger (2014): Bewertungsansätze zu Verbrauch und Fahrleistung, S. 207

[65] Lederer (2014): Energieeffizientes Fahren, S. 310

(d.h. Getrieben) die Möglichkeit, die Betriebspunkte des Antriebssystems (allg. Energiewander) festzulegen. Ziel ist hierbei, für einen gegeben Leistungsbedarf nach Möglichkeit einen Betriebspunkt mit maximalem Wirkungsgrad zu bestimmen. Die zweite Möglichkeit besteht in der Anpassung der Nutzung von Nebenfunktionen, die Komfort und Entertainment dienen (z. B. Klimatisierung). Hier besteht das Ziel darin Nebenfunktionen maßvoll und bedarfsgerecht einzusetzen. Nebenfunktionen hingegen, die durch den Fahrzeugbetrieb bestimmt werden (z. B. Fahrzeugbeleuchtung), bieten hingegen nur eine sehr beschränkte bis gar keine Möglichkeit der Nutzungsanpassung durch den Fahrer. Tabelle 2-2 fasst die fahrerseitigen Einflussfaktoren durch Navigation, Fahr- und Betriebsweise zusammen:

Tabelle 2-2 : Fahrerseitige Energieeinflussfaktoren durch Navigation, Fahr- und Betriebsweise

Einflussfaktor		**Beeinflusste Größe**
Route	Wahl einer Route aus einem Netzwerk an Routensegmenten (Kanten) und Verbindungspunkten (Konten)	Gesamtroutenlänge *s:* Zu fahrende Gesamtstrecke einer Transportmission Höhenprofil *h(s)* und daraus abgeleitet Verlauf des Steigungswiderstandes
t_{Ab}	Abfahrtszeitpunkt	Tageszeitabhängiges Verkehrsgeschehen
v_{Fzg}	Geschwindigkeitswahl abhängig von routenbedingten Geschwindigkeitsbegrenzungen und vom Verkehrsgeschehen	Fahrwiderstände (insb. Luftwiderstand) und resultierender Leistungsbedarf für die Fahrzeugbewegung
a_{Fzg}	Beschleunigungswahl abhängig von der Geschwindigkeitswahl und dem Verkehrsgeschehen	Beschleunigungswiderstand
P_{NF}	Leistungsbedarf durch Nebenfunktionen aus der sekundären und tertiären Fahraufgabe	Mechanischer und elektrischer Leistungsbedarf der Nebenaggregate
i_{G}	Getriebeübersetzung (bzw. Gangwahl) und draus abgeleitet Betriebspunkt des Antriebsstranges	Wirkungsgrad η

Die Wahl der Route, die Bestimmung der Solltrajektorie und in eingeschränktem Maße der Bedarf an Nebenfunktionen stellen Freiheitsgrade dar, über die der Fahrer im Rahmen seiner Fahrzeugführungsaufgabe verfügen kann. Über diese Freiheitsgrade legt maßgeblich den Nutzenergiebedarf für eine Transportmission fest.

2.2.4 Allgemeine energetische Optimierungsziele

Die energetische Optimierung des Fahrzeugbetriebs, wie er bisher betrachtet wurde, kann durch die Reduktion der energetischen Verluste im Antriebsstrang, durch die Reduktion des Nutzenergiebedarfs zur Bewältigung der Transportaufgabe sowie durch eine integrierte Energieflussoptimierung erreicht werden. Optimierungsmaßnahmen, die nicht durch den Fahrzeugbetrieb adressiert werden, wie konstruktive Maßnahmen durch Fahrzeughersteller (z. B. Leichtbau) oder fahrzeug- und motortechnische Einflussfaktoren durch den Fahrzeughalter/-nutzer (z. B. Wartung des Fahrzeuges) werden hier nicht betrachtet.

Reduktion der energetischen Verluste im Antriebsstrang

Das energetische Optimierungsziel hier besteht darin bei gegeben Nutzenergiebedarf die aufzuwenden Endenergiemenge zu reduzieren, was durch die Reduktion der Energieverluste im Antriebsstrang erreicht werden kann. Dies wird durch eine Erhöhung des energetischen Gesamtwirkungsgrades ausgedrückt. Erreicht werden kann die Reduktion der energetischen Verluste durch die

- Maximierung der Ausschöpfung des Rekuperationspotentials, sowohl durch Rekuperation mittels technischer Systeme als auch durch natürliche Rekuperation (Segeln) sowie durch Nutzung des Schubbetriebs.
- Nutzung von Betriebspunkten mit maximalen Wirkungsgraden und daher Reduktion von Verlusten.

Erreicht werden können diese Ziele durch eine optimale Steuerung der Energieströme im Fahrzeug mittels Nutzung der zur Verfügung stehenden inneren Freiheitsgrade. Die effiziente Nutzung und Verteilung der im Fahrzeug eingesetzten Energie und deren Rückgewinnung kann auch unter dem Begriff Energiemanagement zusammenfasst werden[66]. In diesem Zusammenhang sei angemerkt, dass die Wahl der Betriebszustände Rekuperation, Segeln und Schubbetrieb, die sich durch die inneren Freiheitsgrade ergeben, auch stets die äußeren Freiheitsgrade beeinflussen. So verzögert ein Fahrzeug im Rekuperationsbetrieb stärker verglichen zu einem segelnden Fahrzeug. Die Wahl eines Arbeitspunktes hingegen beeinflusst die äußeren Freiheitsgrade nicht.

[66] Haupt (2013): Ein multiphysikalisches Simulationsmodell zur Bewertung von Antriebs- und Wärmemanagementkonzepten im Kraftfahrzeug, S. 1

Reduktion des Nutzenergiebedarfs einer Transportaufgabe

Während bei der Reduktion der energetischen Verluste im Fahrzeug die inneren Freiheitsgrade genutzt werden, ist bei der Reduktion des Nutzenergieberdarfs das Ziel die äußeren Freiheitsgrade zu optimieren. Durch die Wahl der Route und der anschließenden Bestimmung der Solltrajektorie wird die Nutzenergie bestimmt, die benötigt wird um das Fahrzeug vom Start- zum Zielpunkt zu bewegen.

Integrierte, vorausschaubasierter Energieflussoptimierung

Durch eine integrierte, aufeinander abgestimmte Steuerung der äußeren und inneren Freiheitsgrade können die energetischen Verluste im Antriebsstrang reduziert werden. Bei diesem Ansatz werden die äußeren Freiheitsgrade, d.h. das Fahrprofil und die Route so gewählt, dass der Energiefluss im Antriebstrang zu Realisierung des Fahrprofils möglichst verlustlustarm dargestellt werden kann. So kann es beispielsweise energetisch günstiger sein, vor einer Senke die Geschwindigkeit des Fahrzeuges zu erhöhen (d.h. Energie zu investieren), um die Senke anschließend komplett im Segelbetrieb durchfahren zu können. Für solch eine integrierte Optimierung ist jedoch entsprechend weitreichende Vorausschauinformation erforderlich.

2.2.5 Allgemeine Assistenzansätze für die energetischen Optimierung

Unter Assistenzansätzen wird die Darstellung bzw. Umsetzung der Optimierungsergebnisse verstanden. Es wird zwischen informierenden, vorschlagenden/empfehlenden und ausführenden Ansätzen unterschieden.

Als **informierende Assistenz** werden Darstellungssysteme zusammengefasst, die dazu dienen den Fahrer mit zusätzlichen Informationen über das Umfeld und den Fahrzeugzustand zu versorgen. Mit diesen Informationen soll der Fahrer unterstützt werden mittels Nutzung der inneren und äußeren Freiheitsgrade einen energieeffizienten Fahrzeugbetrieb unter gegebenen Randbedingungen darstellen zu können. Betont werden soll an der Stelle, dass die Gestaltung der Optimierungsstrategien für die Freiheitsgrade in diesem Fall vollständig dem Fahrer obliegt. Durch die informierende Assistenz wird ihm lediglich eine erweiterte Informationsbasis zur Verfügung gestellt. Diese Assistenz wird im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.

Vorschlagende Assistenz hingegen zielt darauf ab, den Fahrer bereits mit konkreten Handlungsempfehlungen zu unterstützen. Die Aufgabe der Gestaltung der Optimierungsstrategie wird hier durch das Assistenzsystem übernommen. Die Aufgabe des Fahrers besteht darin, die Handlungsempfehlung zu prüfen und diese dann ggf. auszuführen.

Wird die Optimierungsstrategie durch das Assistenzsystem auch ausgeführt, wird das als **ausführende Assistenz** bezeichnet. Der Fahrer hat in diesem Fall die Aufgabe, der Ausführung zuzustimmen und sie zu überwachen.

Das folgende Schema fasst die Abstufung zur Assistenz zusammen:

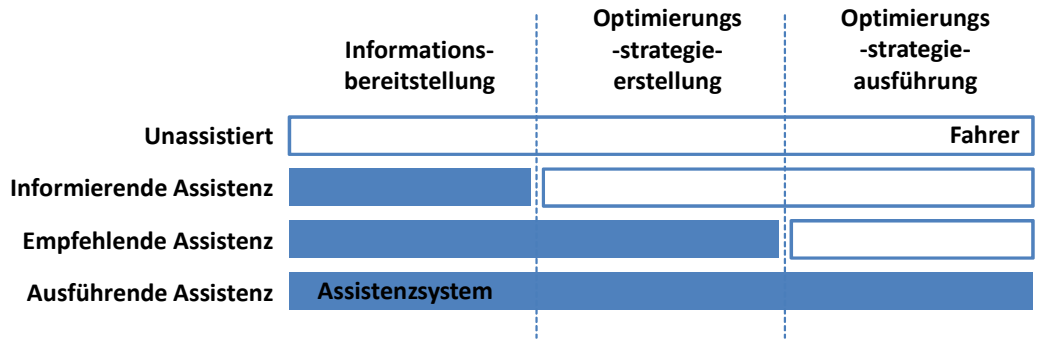

Abbildung 2-5: Schema zur Assistenzabstufung

Im Bereich der Betriebsweise kann der Fahrer durch Assistenz dabei unterstützt werden, den Energiebedarf für durch ihn steuerbare Nebenverbraucher zu reduzieren. Das beinhaltet beispielsweise den Betrieb der Klimatisierung oder der elektrischen, komfortrelevanten Verbraucher. Eine direkte Beeinflussung des Energiemanagements ist hingegen nur einschränkt durch den Fahrer möglich. Diese Einflussmöglichkeit beschränkt sich auf die Wahl des Motorbetriebspunktes und damit auf die Verlustleistung bedingt durch die Wahl einer Getriebestufe. In Fahrzeugen mit komplexen, elektrifizierten Antriebssträngen mit den vielfältigen Energieflussmöglichkeiten wird diese Aufgabe abseits vom Fahrer durch die die HCU (Hybrid Contol Unit) durchgeführt. Ein System zur Optimierung des Energiemanagements von elektrifizierten Antriebssträngen wird daher nicht als Assistenzsystem im engeren Sinne verstanden, da es nicht den Fahrer von einer Aufgabe entlastet/ihn dabei unterstützt, sondern wird es wird als Bestandteil der Betriebsstrategie betrachtet. Im Zuge der Entwicklung einer Referenzarchitektur für Assistenzsysteme zur energetischen Optimierung des Fahrbetriebs werden vorausschauende Betriebsstrategien jedoch mit betrachtet, da diese ebenfalls energetische Optimierungsprobleme behandeln, jedoch primär aus Perspektive der Umsetzung einer Fahrstrategie.

Im folgenden Kapitel 2.3 werden konkrete Ausprägungen von Assistenzsystemen/Assistenzsystemkonzepten sowie Betriebsstrategiekonzepten vorgestellt, die auf Grundlage von Vorausschauinformationen der energetischen Optimierung dienen.

2.3 Vorausschaubasierte Systeme zur energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebs

Zur energieeffizienteren Gestaltung des Fahrbetriebs besteht die Möglichkeit die Bestandteile Navigation, Fahrweise, Betriebsweise und Betriebsstrategie mittels vorausschauenden Systemen zu beeinflussen. Die Beeinflussung kann dabei informierend, empfehlend oder ausführend gestaltet werden. Aus der Kombination von zu optimierendem Fahrbetriebsbestandteil und Assistenzansatz lassen sich Bereiche ableiten, denen die unterschiedlichen Ausprägungen von Assistenzsystemen zugeordnet werden können. Tabelle 2-3 gibt einen Überblick über die möglichen Bereiche.

Tabelle 2-3: Überblick über energieeffizienzsteigernde Fahrerassistenz

		Bestandteile Fahrbetrieb			
		Navigation	Fahrweise	Betriebsweise	Betriebsstrategie
Assistenzansatz	Informierend	Verkehrsinformationen (z.B aktuelle und prädizierte Verkehrsdichte)	Streckenvorausschau • Hinweise auf statische Elemente (Steigungen, Kurven, Geschwindigkeitsänderungen, Ortsschilder, Tunnel, etc.) • Hinweise auf dynamische Elemente (LZA-Status, vorausfahrende Fahrzeuge, etc.)		X
	Empfehlend	Bestimmung von energieeffizienten Routen (eco-routing)	Vorausschaubasierte Fahrempfehlungen (z.B. Ampelassistenz, Segel-/Ausrollhinweise, Geschwindigkeitsempfehlungen, Beschleunigungsempfehlungen	Vorausschaubasierte Bedienempfehlung für (Neben)Aggregate (z.B. Abschaltung VKM an LZA, Gangwahl, Klimatisierung vor Tunneln)	X
	Ausführend	X	Erweiterung automatisierte Längsführung (z.B. energieoptimierte Annäherung an vorausfahrende Fzg., topographieoptimale Längsführung)	Vorausschaubasierte Steuerung der (Neben-)Aggregate	Vorausschauende Antriebsstrangregelung für Hybridfahrzeuge

2.3.1 Navigationssysteme

Zur Gruppe der vorausschaubasierten Assistenzsysteme zur energetischen Optimierung des Fahrbetriebs lassen sich auch Navigationssysteme hinzuzählen, da durch die Wahl und gegebenenfalls dynamische Anpassung einer Route der Energiebedarf für eine Fahrmission beeinflusst wird. Die digitalen und zum Teil mit dynamischen Informationen angereicherten Kartendaten stellen dabei die Vorausschauinformationen dar, auf denen Navigationssysteme die Planungsaufgabe ausführen.

Für den Anwender ergibt sich durch die Nutzung einer hinsichtlich energetischer Aspekte optimierten Routenplanung eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs für eine Fahrmission bzw. eine Erhöhung der Reichweite. Insbesondere bei Elektrofahrzeugen stellt die Reichweitenerhöhung ein Kriterium dar, um die Alltagstauglichkeit zu erhöhen.

Neben den konventionellen Planungsvorgaben „schnellste Route“ und „kürzeste Route“ bieten Navigationssysteme daher verbreitet die Option einer energieoptimalen Routenplanung (z. B. *BMW Eco-Pro-Route*[67]), häufig mit „Eco“ bezeichnet. Diese beziehen Kriterien, wie die Vermeidung von Ortsdurchfahrten, Bergfahrten mit großen Steigungen und hoher Verkehrsdichte/Staus in die Routenauswahl mit ein[68]. Auch der Treibstoffbedarf wird als Kriterium verwendet[69].

Die Verwendung zusätzlicher Informationen bietet Potential, die Eco-Routenplanung zu optimieren. Diese Informationen sind zum einen erweiterte Kartenattribute und zum anderen Informationen über das zugrundeliegende Fahrzeug hinsichtlich Antriebsstrang und Fahrzeugtyp[70] [71]. Bei den erweiterten Kartenattributen handelt es sich um statische Attribute (z. B. Steigungen, Kurvenradien, Geschwindigkeitsbeschränkungen), dynamische Attribute (z. B. Status Lichtzeichenanlagen, Verkehrsdichten- und Geschwindigkeiten, Informationen zu Homogenität des Verkehrsflusses) sowie historische Verkehrsdaten[72].

Untersuchungen zeigen, dass durch die Nutzung von Eco-Routing Funktionen in Navigationssystemen ein großes Potential zu Energieeinsparung im Fahrbetrieb besteht.

---

[67] Pudenz (2012): Vorausschauendes Fahren: bei BMW lernt der Antrieb sehen, Zugriff am 22.01.2016

[68] Lederer (2014): Energieeffizientes Fahren, S.320

[69] Kleine-Besten et al (2015):Navigation und Verkehrstelematik, S. 1054

[70] Pandazis (2010): Navigation, Cooperative Driving and EcoMobility, S. 10

[71] Pudenz (2011): Eco-Routing: Spezielle Navigationsalgorithmen optimieren Energiebilanz, Zugriff am 22.01.2016

[72] Vreeswijk et al. (2014): eCoMove: integration of results and conclusions, S. 4

Hierfür ist es jedoch erforderlich, den jeweils spezifischen Antriebsstrang in der Bestimmung der Route zu berücksichtigen[73].

2.3.2 Fahrweisenoptimierende Systeme

Informierende Systeme zur Fahrweisenoptimierung beruhen auf dem Ansatz dem Fahrer eine erweiterte Streckenvorausschau zur Verfügung zu stellen. Eine erweiterte Streckenvorausschau kann dabei Hinweise auf vorausliegende statische Elemente, wie z. B. Kurven, Steigungen, Geschwindigkeitsbegrenzungen, und auf vorausliegende dynamische Elemente beinhalten. Speziell bei den dynamischen Elementen liegt der Informationsgewinn für den Fahrer in einer zeitlichen Vorausschau auf das jeweilige Element. Konkrete Systemausprägungen sind z. B. Systeme zur Anzeige der Restdauer der aktuellen Phase einer vorausliegenden LZA. Da diese Systeme die eigentliche Optimierungsaufgabe, d.h. Bestimmung einer energieoptimalen Fahr- und Betriebsweise, dem Fahrer überlassen, werden sie im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Empfehlende Systeme verfolgen das Assistenzziel, durch die Ausgabe von konkreten Handlungsempfehlungen die Fahrweise zu beeinflussen. Für die Umsetzung der Handlungsempfehlung in Fahrzeugstellgrößen ist dabei der Fahrer zuständig. Ausführende Systeme hingegen übernehmen auch diese Aufgabe und stellen daher Systeme bzw. Erweiterungen von Systemen zur automatisierten Längsführung (z. B. ACC) dar. Desweiteren können die Systeme zur Fahrweisenoptimierung unterschieden werden in Systeme zur Optimierung von vorausliegenden Manövern und in Systeme zur Bestimmung einer optimalen Fahrweise für den Gesamtvorausschauhorizont.

Manöverbasierte Optimierung

Die Optimierung von Manövern verfolgt das Ziel, auf Grundlage einer Situationserkennung, welche zuvor definierte und als relevant eingestufte Fahrsituationen aus den Vorausschaudaten extrahiert, energieeffiziente Fahrstrategien zu bestimmen und über den Fahrer oder über die Automatisierung zur Anwendung zu bringen. Die wesentlichen Fahrsituationen stellen dabei Annäherungen an statische Elemente und dynamische Elemente dar, da über die Wahl bzw. Gestaltung einer Verzögerungsstrategie (z. B. Segelbetrieb versus Rekuperation) der Energiebedarf für das Annäherungsmanöver maßgeblich beeinflusst werden kann. Dieses Ziel wird beispielsweise im System *Green Driving*[74] von Volkswagen verfolgt, das auf Grundlage eines elektronischen Horizonts für die Annäherung an statische Elemente vorausschauende Strategien aus Freilauf- und

[73] Richter et al. (2012): Comparison of Eco and Time Efficient Routing of ICEVs , BEVs and PHEVs in Inner City Traffic, S. 1168

[74] Dornieden et al. (2012): Vorausschauende energieeffiziente Fahrzeuglängsregelung, S. 230-235

Schubbetrieb plant und automatisiert ausführt. Die fehlerfreie Planung der Verzögerungsmanöver ist dabei abhängig von der Qualität, Verfügbarkeit und vor allem der Aktualität des zugrundliegenden Kartenmaterials. Einen vergleichbaren Ansatz verfolgt der bereits in Serie verfügbare *Prädiktive Effizienzassistent* von Audi[75], der neben der automatisierten Ausführung im Zusammenhang mit einem aktivierten ACC-System, auch empfehlend nutzbar ist. In diesem Fall wird der Fahrer vor der Annäherung beispielsweise an eine Kurve frühzeitig genug aufgefordert den Fuß vom Fahrpedal zu nehmen, um ohne Bremseinsatz die Fahrzeuggeschwindigkeit bis zum Kurveneingang zu reduzieren. Auch der *Vorausschauassistent* von BMW[76] verfolgt einen vergleichbaren, informierenden Ansatz. Neben Verzögerungsmanövern können auch Beschleunigungen und Konstantfahrten als Fahrmanöver optimiert werden[77]. Die Effizienzsteigerung wird dabei dadurch erreicht, dass bei der Planung der Manöver die Wirkungsgradcharakteristiken des zugrundliegenden Antriebsstranges berücksichtigt werden. Ziel ist die Arbeitsbereiche mit niedrigen Wirkungsgraden zu vermeiden bzw. bei hybriden Antriebssträngen das Rekuperationspotential maximal auszuschöpfen. Dies resultiert beispielweise darin, dass durch die Längsregelung mit kartenbasierter Vorausschau nach Zlocki[78] vor Gefällstrecken eine vom Fahrer gesetzte Fahrzeuggeschwindigkeit vorausschauend angepasst wird, da so das größte Potential für die Rekuperation von Energie entsteht. Auch die vorausschauende Längsregelung schwerer Lastkraftwagen nach Terwen[79] setzt auf das Konzept basierend auf einer Streckenvorausschau eine optimale Steuerung für das Motorsollmoment, die Bremssollmomente sowie den Sollgang zu ermitteln. Das System erhöht die Fahrzeuggeschwindigkeit vor Steigungen und setzte eine vorausschauende Fahrweise auch in Situationen um, an denen der Fahrer die künftige Strecke nicht einsehen kann. Beide Längsregelungssysteme formulieren dabei das Optimierungsproblem als Modellbasierte Prädiktive Regeleung (MPR). Der Vorteil einer Regelung gegenüber abgespeicherten Berechnungen zu optimalen Fahrweisen ist der unbeschränkte Einsatz auf allen Straßen, die in entsprechenden Kartendaten abgelegt sind[80]. Ein exemplarisches Seriensystem im Nutzfahrzeugbereich, das eine

[75] http://www.audi-technology-portal.de/de/elektrik-elektronik/fahrerassistenzsysteme/audi-a4-praediktiver-effizienzassistent-de; letzter Zugriff am 22.01.2017

[76] Pudenz (2012): Vorausschauendes Fahren: bei BMW lernt der Antrieb sehen

[77] Neunzig (2003): Fahrerassistenzsysteme zur Verbrauchsminderung von Kraftfahrzeugen, S.86ff

[78] Zlocki (2010): Fahrzeuglängsregelung mit kartenbasierter Vorausschau, S.135

[79] Terwen (2010): Vorausschauende Längsregelung schwerer Lastkraftwagen

[80] Zlocki (2010): Fahrzeuglängsregelung mit kartenbasierter Vorausschau, S.136

derartige Längsregelung umsetzt, ist die *Predictive Powertrain Control* (PPC) für Nutzfahrzeuge von Daimler[81].

Diese Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass sie die Fahrweise über die Optimierung des Betriebs des Antriebstranges (Betriebsweise/Betriebsstrategie) mit beeinflussen. Das bedeutet, dass sich die Optimierung der inneren Freiheitsgrade (entspricht der Nutzenergiebereitstellung durch den Antriebsstrang) direkt auf die äußeren Freiheitsgrade (Geschwindigkeit und Beschleunigung) auswirkt. Dieser Ansatz eignet sich daher primär bei einer automatisierten Längsführung, da hier der Fahrer die Längsführung an das Assistenzsystem abgibt und das Assistenzsystem die Längsführung selbstständig entsprechend der Optimierung ausführt. Führt hingegen der Fahrer mittels Fahr- und Bremspedal das Fahrzeug, darf eine Optimierung die Fahrweise nicht unerwartet beeinflussen, sondern es muss sichergestellt werden, dass die Fahrereingaben zu jedem Zeitpunkt umgesetzt werden. In diesem Fall darf ein Optimierungssystem nur noch die inneren Freiheitsgrade des Antriebsstranges selbstständig führen. Reine Betriebsweisen- bzw. Betriebsstrategieoptimierungen verfolgen dieses Ziel.

Neben der Optimierung der Annäherung an statische Elemente kann auch das Annäherungsverhalten an dynamische Elemente optimiert werden. Bei dynamischen Elementen wird aktuell dabei hauptsächlich zwischen vorausfahrenden, langsameren Fahrzeugen und Lichtzeichenanlagen unterschieden.

Analog zu den bereits vorgestellten Systemen kann das Assistenzkonzept zur **Annäherung vorausfahrende Fahrzeuge** empfehlend[82] oder ausführend ausgelegt werden. Das als *Eco-ACC*[83] bezeichnete ausführende System folgt dabei dem Ansatz, dass es sich mehr Zeit für die Annäherung an das vorausfahrende Fahrzeug lässt. Die Zeit wird dafür genutzt, dass das System nach einer kurzen Rekuperationsphase einen beträchtlichen Teil des Manövers im Segelbetrieb ohne Energieverbrauch für den Vortrieb zurücklegt.

In Bereich der Optimierung der **Annäherung und Passage von Lichtzeichenanlagen** besteht beim *Traffic Light Assistant* von BMW das Ziel, den Fahrer durch die Bereitstellung eines idealen Geschwindigkeitsbereiches zu unterstützen, bei dem die in Fahrtrichtung liegenden Lichtzeichenanlagen bei Freigabe überquert werden können[84]. Ist eine Freigabephase nicht mehr erreichbar, wird dies dem Fahrer ebenfalls mitgeteilt. Grundlage für die Bestimmung des idealen Geschwindigkeitsbereiches bilden Prognosen des

[81] http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/bus/home/new_buses/models/touring_coaches/Travego_edition_1/facts/economy/ppc.html, letzter Zugriff am 20.01.2017

[82] Kohlhaas et al. (2011): Energy Saving Assistant for Approaching Slower Vehicles, S.1966-1971

[83] Flehmig et al. (2015): Eco-ACC für Elektro- und Hybridfahrzeuge, S. 11-17

[84] Protschky & Feit (2015): Traffic Light Assistance

zukünftigen Schaltverhaltens der LZA an Kreuzungen, die auf der Wegstrecke liegen. Die Prognosen des Schaltverhaltens, die offboard in einem Backend generiert werden, stellen dabei die wesentliche Herausforderung dar, da ein Großteil der weltweiten LZA verkehrsabhängig gesteuert wird[85] . Die Verfahren der Prognosen, die entweder mithilfe statistischer Methoden oder durch Nachbildung und Simulation eines jeden Kreuzungsknoten erfolgen müssen, richten sich dabei nach Art und Qualität der zugrundeliegenden Daten[86].

Ein vergleichbarer Ansatz wird im Projekt *Ampelinfo online* von Audi verfolgt[87]. Dabei werden ebenfalls die Darstellung der aktuellen Lichtsignalphase der vorausliegenden LZA bzw. der verbleibenden Zeit zum Wechsel sowie eine Geschwindigkeitsempfehlung dem Fahrer angezeigt. Die Bereitstellung des aktuellen und des prognostizierten LZA-Zustandes erfolgt dabei mittels Mobilfunk.

Grundlegende Verfahren zur Bestimmung einer Fahrerempfehlung mit dem Ziel eines minimalen Energiebedarfs liefern beispielsweise die Arbeiten von Schuricht[88] und Guan[89]. Im Beitrag von Guan wird dabei neben einer Geschwindigkeitsempfehlung auch eine Schaltempfehlung bestimmt. Die Bestimmung der Fahrgeschwindigkeiten und Schaltstrategien ist dabei als Optimierungsproblem formuliert, das auf der Dynamischen Programmierung nach Bellmann beruht. Für den verfolgten Ansatz wird dabei neben den Zeitinformationen der Lichtsignalanalagen auch ein Verbrauchsmodell des zugrundeliegenden Fahrzeuges erforderlich.

Bestimmung von optimalen Fahrweise für den Gesamtvorausschauhorizont

Das ausführende Längsführungssystem *InnoDrive* von Porsche stellt eine Weiterentwicklung des bisherigen ACC-Systems dar[90] [91]. Es nimmt eine ganzheitliche Auswertung von Topographie- und Umfeldinformationen vor und bestimmt daraus eine optimale, vom Fahrer parametrierbare Sollgeschwindigkeitstrajektorie für den gesamten Vorausschauhorizont. Das Optimierungsergebnis beinhaltet auch die Sollbetriebsweisen in Form der Getriebestufe, dem Fahrmodus (Zug-, Segel-, Motorschubbetrieb) und den

[85] Protschky & Feit (2015): Traffic Light Assistance, S. 582

[86] Protschky et al. (2014): Adaptive Traffic Light Prediction via Kalman Filtering, S. 151-157

[87] Schneider (2014): Audi Urban Future Initiative - Auf der grünen Welle, letzter Zugriff am 20.01.2017

[88] Schuricht et al. (2011): Efficiency-Increasing Driver Assistance at Signalized Intersections

[89] Guan & Frey (2013): Predictive fuel efficiency optimization using traffic light timings.

[90] Roth et al. (2011): Porsche InnoDrive, S.1453-1467

[91] Markschläger et al (2012): Assistenzsystem für mehr Kraftstoffeffizienz, S.850-855

Motor- und Bremsmomenten. Bei der Berechnung der optimalen Sollgeschwindigkeitstrajektorie fließen gesetzliche Höchstgeschwindigkeiten, maximal/minimal tolerierbare Längs- und Querbeschleunigungen sowie Erkennungen von Kuppen ein. Zur Lösung dieses Optimierungsproblems wird ein ressourceneffizienter Algorithmus auf Basis der Dynamischen Programmierung verwendet, der in der Lage ist, die vielschichtigen Anforderungen an die Fahrstrategie hinsichtlich Energieeffizienz, Fahrdynamik, Fahrkomfort und Fahrsicherheit zu berücksichtigen[92]. Der Optimierungsansatz kennzeichnet sich dadurch auch, dass der ideale Betriebszustand nicht fallspezifisch (ereignisbasiert) gewählt ausgewählt wird, sondern eine global optimierte Strategie bestimmt wird[93]. Hierfür sucht der Algorithmus aus allen möglichen Betriebszuständen in einem relevanten vorausliegenden Horizont die Abfolge von Zuständen heraus, die unter den Randbedingungen gesamtoptimal sind. So nutzt der globale Optimierungsansatz beispielsweise bei Fahrstrecken mit wechselnden Steigungs- und Gefälleanteilen über den gesamten Vorausschauhorizont die kinetische und potenzielle Energie des Fahrzeugs voll aus, anstatt fallspezifisch Beschleunigungs-, Konstantfahrt- und Verzögerungsvorgänge einleiten. So kann dies zur Folge haben, dass vor Senken zusätzliche kinetische Energie aufgebaut wird. Diese zusätzliche Energie ermöglicht im Anschluss eine sehr lange Segelphase über den kleineren Anstieg bei Senkenausfahrt hinweg, die verbrauchsgünstiger ist als eine Mischung aus Schub- und Zugphasen. Durch die Nutzung einer solchen global optimierten Strategie kann der Streckenverbauch gegenüber einer ereignisbasierten Strategie bei gleicher Fahrtzeit deutlich reduziert werden.

Als Forschungssystem greift Audis *Prädiktiver Effizienzassistent*[94] für das intelligent Hybrid Electric Vehicle (iHEV) diesen globalen Optimierungsansatz ebenfalls auf. Der Effizienzassistenz sieht neben der ausführenden Assistenz auch eine empfehlende Assistenz vor, die dem Fahrer Hinweise gibt, wann er beschleunigen bzw. den Fuß vom Fahrpedal nehmen soll.

Ebenfalls die dynamische Programmierung nach Bellmann nutzend, wird in der automatisierten Längsführung zur Optimierung der Energieeffizienz nach Themann[95] eine optimale Geschwindigkeitstrajektorie unter Berücksichtigung der verschiedenen Betriebsmodi des zugrundeliegenden Fahrzeugs bestimmt. Bei Themann werden dabei nicht nur statische Vorausschauinformationen aus der

[92] Radke (2013): Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien, Kurzfassung

[93] Markschläger et al (2012): Assistenzsystem für mehr Kraftstoffeffizienz, S.852

[94] http://www.audi-technology-portal.de/de/mobilitaet-der-zukunft/audi-future-lab-mobility/audi-future-engines/praediktiver-effizienzassistent, letzter Zugriff am 20.01.2017

[95] Themann (2015): Automatisierten Längsführung zur Optimierung der Energieeffizienz

digitalen Karte sowie Informationen über Vorausfahrer aus der On-Board-Sensorik genutzt, sondern ebenfalls kooperative Informationen aus der Fahrzeug-Fahrzeug- und Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation. Mittels der Nutzung dieser zusätzlichen Informationen wird für den Fahrer der Hauptnutzen generiert, dass durch die automatisierte Einleitung einer frühzeitigen Verzögerung vor Signalanlagen unnötige Stillstandsphasen vermieden werden, ohne dabei die Gesamtfahrzeit zu verlängern[96]. Ein Kernelement im Systemdesign stellt dabei die Prädiktion des unassistierten Ego-Fahrverhaltens sowie des Verhaltens der Vorderfahrzeuge durch eine Verkehrsflusssimulation dar. Die Prädiktion des unassistierten Ego-Fahrverhaltens, der ein parametrierbares Fahrermodell zugrundeliegt, wird als Referenz zur Bewertung der optimalen Fahrstrategie verwendet. So wird sichergestellt, dass Fahrstrategien ermittelt werden, die energieeffizient sind, jedoch nur geringfügig vom durchschnittlichen Fahrverhalten abweichen. Ziel ist, durch diesen Ansatz eine hohe Fahrerakzeptanz des Assistenzsystems zu gewährleisten.

2.3.3 Betriebsweisenoptimierende Systeme

Im Bereich der auf Vorausschaudaten basierenden Systeme zur energetischen Optimierung der Betriebsweise sind im Wesentlichen Ansätze zur Optimierung der Getriebeschaltstrategie sowie zum vorausschaubasierten Thermomanagement vorzufinden.

Beim prädiktiven Gangwechselsystem nach Müller[97] stellt die Vorhersage der Geschwindigkeit, die der Fahrer über einen Streckenhorizont wünschen wird, einen wesentlichen Bestandteil des Systems dar. Zusammen mit Steigungsinformation prädiziert das System den Leistungsbedarf des Fahrzeuges um damit über die vorausschauende Wahl der Gangstufe den Antriebsstrang in Bezug auf geringen Kraftstoffverbrauch optimierend regeln zu können. Die Energieoptimierung wird dabei dadurch erreicht, dass das prädiktive Gangwechselsystem, verglichen mit einem konventionellen Schaltprogramm, deutlich früher die Gänge hochschaltet, wenn laut Prädiktion keine Zugkraftreserven (z. B. zum Beschleunigen) vorgehalten werden müssen. Auch das von BMW vorgestellte vorausschauende Getriebemanagement[98] greift auf digitale Kartendaten zu, um vorausschauend das Automatikgetriebe zu steuern. So nutzt das Getriebemanagement im Eco-Pro-Modus die Vorausschauinformationen um unter anderem das Getriebe vom Motor zu entkoppeln, sodass ein energieeffizient im Segel-Betrieb möglich wird.

---

[96] Themann et al (2015): Energieeffiziente Fahrzeuglängsführung durch V2X-Kommunikation, S:27

[97] Müller et al. (2004): Ein prädiktives Gangwechselsystem für Kfz

[98] Pudenz (2012): Vorausschauendes Fahren: bei BMW lernt der Antrieb sehen

Vorausschauende Systeme zur Steuerung des Thermomanagements bieten ebenfalls Potential zur Reduzierung des Energiebedarfs. So stellt die Klimatisierung des Fahrzeuginnenraums neben dem Antrieb das Subsystem dar, das den zweitgrößten Energieumsatz besitzt[99]. Eine Optimierung kann beispielsweise dadurch erreicht werden, dass durch gezieltes Vorbereiten auf eine Stopp-Phase die Verdampfertemperatur vorab absenkt wird, um so den Motorstopp verlängern zu können. Hierfür müssen die vorausliegenden Betriebspunkte des Antriebstranges bekannt sowie die Motorstopp-Phasen planbar sein[100]. Beim von Khayyam[101] vorgestellten Ansatz stellt das Vorausschausystem Steigungsinformationen in einem Abstand von 300-500m bereit, unter deren Berücksichtigung ein Fuzzy-Regler den Betrieb der Innenraumklimatisierung regelt. Verglichen mit einem nicht vorausschauenden Regler zeigt die Untersuchung ein Energiesparpotential von 3% auf.

2.3.4 Vorausschauende Betriebsstrategien für Hybridfahrzeuge

Betriebsstrategien für Hybridfahrzeuge verfolgen das Ziel, unter Ausnutzung der inneren Freiheitsgrade des Antriebsstranges eine gewünschte Fahrweise optimal umzusetzen. Die gewünschte Fahrweise wird dabei vom Fahrer mittels Fahr- und Bremspedal mitgeteilt und stellt die Führungsgröße für die Betriebsstrategie dar. Im Gegensatz zu Systemen, die in die Fahrweise und Betriebsstrategie integriert optimieren (vgl. Porsche *InnoDrive*), wirkt sich eine Betriebsstrategieoptimierung nicht auf die Fahrweise aus. Analog zu bereits vorgestellten vorausschauenden Optimierungsansätzen macht sich eine vorausschauende Betriebsstrategie dabei Informationen zu der vorausliegenden Strecke zu Nutze.

Ideale Steuertrajektorien lassen sich mit nichtkausalen Optimierungsmethoden bestimmen, die auf dem Verfahren der Dynamischen Programmierung basieren, wie z. B. bei Back[102]. Für die Bestimmung der global-optimalen Steuertrajektorien einer kompletten Fahrt muss jedoch der komplette Fahrtverlauf a priori bekannt sein. Eine notwendige Eingangsgröße stellt daher das erwartete, zukünftige Fahrprofil dar. Das Verfahren wird daher insbesondere für die Bestimmung von Referenzwerten während der Entwicklung von Betriebsstrategien verwendet, da hier definierte Fahrzyklen als Vergleichsgrundlage verwendet werden. Ist das Verfahren für den Fahrzeugeinsatz gedacht, liegt dieses Wissen a priori nicht vor, weshalb der zukünftige Fahrtverlauf prädiziert oder über stochas-

[99] Roth (2014): Betriebsstrategien, S.345

[100] Roth (2014): Betriebsstrategien, S.346

[101] Khayyam et al. (2011): Intelligent air conditioning via look-ahead system

[102] Back (2005): Prädiktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen, S. 29

tische Prozesse modelliert werden muss. Der prädizierte Fahrverlauf und die prädizierte Steigung stellen die Eingangsgrößen in ein Fahrzeugmodell dar, das die Grundlage für die Bestimmung der energieoptimalen Steuertrajektorien durch einen Optimierer bildet.

Äquivalentverbrauchsstrategien, die auf Pontryagins Minimumprinzip fußen, stellen kausale und nicht vorausschauende Optimierungen dar, die die äquivalenten Kraftstoffkosten zu jedem Rechenschritt minimieren. Die äquivalenten Kraftstoffkosten werden dabei durch die Nutzung eines Äquivalenzfaktors, der die Gewichtung der elektrischen gegen die verbrennungsmotorische Energie bestimmt, berechnet[103]. Ambühl zeigt jedoch, dass die nichtvorausschauenden Äquivalentverbrauchsstrategien bei Fahrzyklen mit Höhenänderungen und vielen Möglichkeiten zur Energierekuperation beim Ergebnis wesentlich vom globalen Optimum abweichen[103]. Um dem Problem zu begegnen, wird ein prädiktiver Referenzsignalgenerator vorgeschlagen, der eine vorausschaubasierte Referenztrajektorie für den Batterrieladegrad (State-of-Charge) generiert. Diese Referenztrajektorie dient als zusätzlicher Eingang für die Äquivalentverbrauchsstrategie, die weiterhin nicht-prädiktiv ausgelegt wird. Für die Generierung der Referenztrajektorie benötigt der Generator als Eingangsgrößen das Steigungsprofil sowie die durchschnittlichen Reisegeschwindigkeiten auf den vorausliegenden Straßensegmenten.

Die von Kunkel[104] vorgeschlagene Strategie zum optimalen Betrieb von Dieselhybridantrieben sieht eine Kombination aus prädiktiver Optimierung und einer nachgelagerten Online-Optimierung vor. Während für die prädiktive Optimierung das Verfahren der dynamischen Programmierung verwendet wird, basiert die Online-Optimierung auf dem Minimumprinzip nach Pontryagin. Die prädiktive Optimierung rechnet bei Fahrtbeginn anhand eines prädizierten Geschwindigkeitsverlaufs einen optimaler Hybridbetrieb für eine gewünschte Fahrt voraus. Während der Fahrt berechnet der Online-Optimierer dann die optimalen Stellgrößen für die Antriebsaggregate basierend auf dem Fahrerwunsch nach Antreiben oder Abbremsen des Fahrzeugs. Zur bestmöglichen Erfüllung dieser Aufgabe steht dem Online-Optimierer das Ergebnis der prädiktiven Optimierung zur Verfügung. Die Untersuchung der vorgeschlagenen Strategie zeigt, dass eine exakte Prädiktion des zukünftigen Fahrtverlaufs nicht erforderlich ist. Bereits die Kenntnis der vorliegenden Geschwindigkeitsbeschränkungen ermöglicht das Erzielen eines Kraftstoffverbrauchs nahe dem theoretischen Minimum.

2.3.5 Fazit

Die vorgestellten vorausschaubasierten Systeme zur energetischen Optimierung adressieren jeweils spezifische Bereiche des Fahrzeugbetriebs. Die im Vergleich funktional

[103] Ambühl (2009): Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicles, S. 111

[104] Kunkel (2015): Optimaler Betrieb von Dieselhybridantrieben, S.4

am umfänglichsten konzipierten Systeme optimieren integriert die Fahrzeuglängsführung und die dazugehörende Betriebsweise auf Grundlage von statischen und dynamischen Vorausschauinformationen (Fahrzeuge und Lichtzeichenanlagen). Es ist jedoch kein Assistenzsystem bekannt, dass eine ganzheitliche energetische Optimierung auf allen Ebenen des Fahrbetriebs verfolgt und sowohl eine empfehlendes als auch ausführende Assistenz zulässt. Auch der Aspekt einer nachträglichen Erweiterung von Funktionalitäten wird in den bekannten Systemen nicht näher betrachtet.

2.4 Vorausschauinformationsquellen

Für die Bereitstellung von Vorausschauinformationen, wie sie die vorausschaubasierte Systeme zur energetischen Optimierung benötigen, werden im Fahrzeug verschiedene Technologien verwendet.

On-Board-Sensorik

On-Board-Sensorik, d.h. Umfeldsensorik, die direkt im Fahrzeug verbaut ist, liefert dynamische Informationen zum direkten Fahrumfeld. Dies sind in erster Linie Abstände und Relativgeschwindigkeiten und -beschleunigungen zu Verkehrsteilnehmern sowie deren Eigenschaften (z. B. Breite, Klassifikation, Bewegungszustand). Aber auch infrastrukturbezogene Informationen wie Fahrstreifenverläufe und Verkehrszeichen können durch On- Board-Sensorik geliefert werden. Bereitstellen können diese Informationen z. B. Radar- und Lidarsensoren sowie Kameras mit Bildverarbeitung. Die Sensoren unterscheiden sich dabei in ihren Eigenschaften, wie Reichweite, Öffnungswinkel sowie in den jeweils gelieferten Informationen.

Digitale Karte und eHorizon

Eine weitere Quelle von Vorausschauinformationen stellen digitale Karten bzw. darauf basierend der elektronische Horizont dar[105]. Zur Nutzung der digitalen Karten für Navigationsaufgaben (d.h. Routenplanung und Routenführung) und für die Bereitstellung des elektronischen Horizontes ist dabei die Eigenlokalsierung, z. B. mittels GNSS (Global Navigation Satellite System), erforderlich. Während digitale Karten allgemein das Wegenetz als Information vorhalten, stellt der elektronische Horizont einen konkreten vorausliegenden Abschnitt des Wegenetzes dar, der auf der geplanten bzw. wahrscheinlichen Route liegt. Bei den Daten, die eine digitale Karte und daraus abgleitet ein elektronischer Horizont bereitstellen, handelt es sich um statische Streckeninformationen wie

[105] Kleine-Besten et al (2015): Navigation und Verkehrstelematik, S. 1065

geometrische Streckencharakteristika (Steigung, Krümmung, Querneigung, etc.), zulässige Höchstgeschwindigkeiten, Verkehrszeichen und Positionen von Lichtzeichenanlagen sowie Anzahl und Kategorie der Fahrstreifen[106].

Um den Informationsgehalt digitaler Karten zu erweitern, bestehen Verfahren[107] [108], um Daten aus On-Board-Sensorik mit Kartendaten zu fusionieren und abzuspeichern, um zukünftig detailliertere Daten mit Metainformationen (z. B. Einfluss der Tageszeit auf Fahrtdauer durch statistische Auswertung der Daten) verwenden zu können.

Verkehrstelematik

Neben der On-Board-Sensorik und den digitalen Karten stellt die Verkehrstelematik[109] eine weitere Quelle für Vorausschauinformationen dar. Kennzeichnend für die Verkehrstelematik ist dabei, dass die Bereitstellung der Daten telekommunikationsbasiert und drahtlos erfolgt. Die Verkehrstelematik lässt sich weiter differenzieren durch die Unterscheidung, mit welchem Kommunikationspartner ein Fahrzeug Daten austauschen kann. Als Kommunikationspartner kommen dabei andere Fahrzeuge (Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation) sowie Infrastruktur (Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation) in Frage. Dies kann unter dem Begriff V2X (Vehicle-2-X)-Kommunikation zusammengefasst werden kann[110]. Bei der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation tauschen die Fahrzeuge in einem beschränkten Bereich Informationen direkt untereinander aus, ohne die Nutzung von Informationszentralen. Ausgetauschte Informationen sind beispielsweise erkannte Gefahren (z. B. Stauende), die an den rückwärtigen Verkehr verteilt werden oder der aktuelle Bewegungszustand (Position, Zeit, Fahrtrichtung, Geschwindigkeit)[111]. Bei der Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation besteht neben der direkten Kommunikation mit Infrastrukturelementen (z. B. einer LZA) auch die Möglichkeit, Informationen indirekt auszutauschen. Die indirekte Kommunikation wird dabei durch Informationszentralen realisiert. Sowohl bei direkter als auch indirekte Kommunikation ist es möglich Nachrichten an alle oder nur an gezielt ausgewählte Verkehrsteilnehmer zu leiten.

Informationen, die die Verkehrstelematik dabei liefert, sind beispielsweise Verkehrsdaten, die Informationen zum Fahrumfeld enthalten (Durchschnittsgeschwindigkeiten,

[106] Radke (2013): Energieoptimale Längsführung von Kfz, S. 26

[107] Schraut (2000): Umgebungserfassung auf Basis lernender digitaler Karten

[108] Schönherr (2011): Kopplung von Sensorinformationen und Geodaten

[109] Kleine-Besten et al (2015): Navigation und Verkehrstelematik, S. 1066

[110] Fuchs et al. (2015): Car-2-X, S. 526

[111] Fuchs et al. (2015): Car-2-X, S. 533

Verkehrsbehinderungen, etc.). Diese Informationen werden entweder unidirektional bzw. broadcastbasiert (z. B. TMC) oder bidirektional bzw. Backend-basiert (z. B. Live-Traffic-Informationen)[109] dem Fahrzeug bereitgestellt. Genutzt werden diese Daten z. B. zur Anreicherung der digitalen Karte und somit zur Optimierung der Navigationsaufgabe. Neben Verkehrsdaten können auch dynamische Informationen zum direkten Fahrumfeld mittels Verkehrstelematik bereitstellt werden. Dies sind z. B. Eigenschaften von Lichtzeichenanlagen (Zustand, Warteschlangenlänge, Umschaltzeit, etc.) oder Wechselverkehrszeichen. Diese Informationen können zur Anreicherung des elektronischen Horizonts bzw. von Assistenzfunktionen direkt (z. B. Ampelassistenz) genutzt werden.

Tabelle 2-4 fasst in einem Überblick die Vorausschautechnologien und die verfügbaren Informationen zusammen.

Tabelle 2-4: Vorausschautechnologien mit Beispielen für verfügbare Vorausschauinformationen entnommen aus [112]

Vorausschautechnologie	**Beispiele für verfügbare Vorausschauinformationen**
On-Board-Sensorik	Dynamische Informationen zum direkten Fahrumfeld • Abstände und Relativgeschwindigkeiten zu Verkehrsteilnehmern und deren Eigenschaften (Breite, Fahrspur, Typ, Bewegungszustand, etc.) • Infrastrukturbezogene Informationen wie Fahrstreifenverläufen und Verkehrszeichen
Digitale Karte und elektronischer Horizont	Statische Streckeninformationen • Geometrische Streckencharakteristika (Steigung, Krümmung, Querneigung, etc.), zulässige Höchstgeschwindigkeiten, Verkehrszeichen und Positionen von Lichtzeichenanlagen sowie Anzahl und Kategorie der Fahrstreifen
Verkehrstelematik	Quasistatische Streckeninformationen (Verkehrsdaten) • Durchschnittsgeschwindigkeiten, Verkehrsbehinderungen auf Streckenabschnitten, Umleitungen, etc. Dynamische Informationen zum direkten Fahrumfeld • Eigenschaften von Lichtzeichenanlagen (Zustand, Warteschlangenlänge, Umschaltzeit, etc.) oder Wechselverkehrszeichen • Eigenschaften von Fahrzeugen (Fahrzugstand, Fahrzeugtyp, Intentionen, Fahrziel, etc.)

[112] Themann (2015): Automatisierte Fahrzeuglängsführung zur Optimierung der Energieeffizienz unter Nutzung kooperativer Informationen, S. 19

2.5 Architekturaspekte für vorausschaubasierte Assistenzsysteme

Die Betrachtung der aktuellen Veröffentlichungen im Bereich der Systeme zur energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebes zeigt, dass bisher keine funktionale Referenzarchitektur diskutiert wird, die die energetische Optimierung von der Navigation bis zur Betriebsstrategie durchgängig betrachtet. Vielmehr existieren fallspezifische Architekturüberlegungen, die jeweils einen unterschiedlich breit gefassten Optimierungsansatz behandeln. Im Folgenden werden strukturelle Muster vorgestellt, die sich aus der Analyse der in dieser Arbeit betrachteten Systemarchitekturen aus dem Bereich ergeben. Sie stellen eine Zusammenfassung der relevanten architektonischen Diskussionspunkte dar.

2.5.1 Funktionale Grobstruktur

Ein grundlegendes Muster, nach dem die betrachteten Assistenzsysteme funktional grob strukturiert sind, ist die Einteilung in die Bereiche zur Informationsbereitstellung, zur Informationsverarbeitung und zur Informationsausgabe bzw. Ausführung. Diese Bereiche werden auch als Perception Layer, Command Layer und Execution Layer bezeichnet[113] [114].

Der Bereich der **Informationsbereitstellung** bzw. der Perception Layer beinhaltet dabei sämtliche Funktionalitäten, um Informationen über das Fahrzeugumfeld, den aktuellen Fahr- und Fahrzeugzustand sowie den Fahrer bzw. den Fahrerwunsch bereitzustellen. Hinsichtlich der Bereitstellung von Umfeldinformation umfasst dies auch die Funktionen zur Fusionierung und Interpretation verschiedener Umfeldinformationsquellen. Die Fusionierung kann dabei sowohl die Sensorfusion umfassen, die mehrere On-Board-Sensoren fusioniert, als auch die Fusion aus verschiedenen Vorausschautechnologien (z. B. Erweiterung der digitalen Kartedaten durch Informationen der On-Board-Sensorik bzw. der Verkehrstelematik).

Im Bereich der **Informationsverarbeitung** sind sämtliche Funktionen zusammengefasst, die die bereitgestellten Informationen zum Umfeld, Fahrzeug und Fahrer verarbeiten und die daraus die optimalen Strategien für Navigation, Fahrweise, Betriebsweise sowie Betriebsstrategie bestimmen. Die innere Struktur im Bereich der Informationsverarbeitung lässt sich dabei weiter untergliedern in die Unterbereiche der Situationsanalyse und Prädiktion sowie der eigentlichen Optimierung. Diese Funktionalitäten

[113] Scheuch et al. (2012): Simplified Architecture by Use of Decision Units, S.123

[114] Sanfridson et al (2011): HAVEit Deliverable D54.3 Active Green Driving: 1st System Functionality, S. 18

benötigen dabei Modellbeschreibungen für das Umfeld, die Fahrzeug und den Fahrer, die als Umfeld-, Fahrzeug- und Fahrermodelle bezeichnet werden.

Im überwiegenden Teil der vorliegenden architektonischen Betrachtungen ist der Bereich der **Informationsausgabe bzw. Ausführung** gleichbedeutend mit der direkten Umsetzung der Optimierungsergebnisse durch Ansteuerung der Aktorik und/oder Mensch-Maschine-Schnittstelle. Es steht dabei die Ausführung durch die Aktorik im Vordergrund, weshalb der Bereich auch als Execution-Layer bezeichnet wird. Diese Betrachtung trifft auf Systeme zu, die einen dauerhaften Zugriff auf die Aktorik besitzen, wie die Systeme zur kontinuierlichen Fahrzeuglängsführung. Entsteht jedoch der Bedarf das Ergebnis der Optimierung an der Schnittstelle zur Ausführung mit anderen Assistenzsystemen im Fahrzeug zu koordinieren, so wird der Bereich der Informationsausgabe um Funktionalitäten zur Ausgabekoordination und -steuerung erweitert. Auch Funktionen zur Ansteuerung der Mensch-Maschine-Schnittstelle nach definierten Filter- und Priorisierungsstrategien (vgl. Heyes[115]) werden hier verortet.

2.5.2 Hierarchisierung von Funktionalitäten

Bei einer Hierarchisierung werden Funktionalitäten in logisch aufeinander aufbauende Ebenen einsortiert, die eine funktionale Modularisierung des Systems ermöglichen. Die zugrundeliegende Idee sieht dabei vor, dass Ebenen der höheren Hierarchie die Gesamtsystemziele in eine Sequenz von unterlagerten Zielen dekomponieren, die in mittleren Ebenen wiederum für die Steuerung und Koordinierung von einzelnen Systemverhalten benutzt werden. Die unterste Ebene enthält schließlich die Funktionalitäten, die zur Berechnung des jeweiligen Systemverhaltens notwendig sind. Dieser Ansatz entstammt ursprünglich dem Bereich der Robotik und kombiniert die Fähigkeit unmittelbar auf das Umfeld durch konkretes Verhalten reagieren zu können mit einer langfristen Planung zur Erreichung komplexer Gesamtziele[116]. Im Automobilkontext findet dieser Ansatz Verwendung im Bereich der Systeme für das automatisierte Fahren, wie beispielweise in der Arbeit von Hohm et al[117]. Darin wird der Bereich der Informationsbereitstellung, auch als Planungsbereich bezeichnet, hierarchisch unterteilt in die Ebenen Mission, Coordination und Behaviour Layer. Der Mission Layer beinhaltet die Funktionen zur Routenplanung und stellt daraus abgeleitet die notwendigen Fahrmanöver an den Verhaltensplaner im Coordination Layer bereit. Der Verhaltensplaner wiederrum kümmert

[115] Heyes et al (2013): Der Virtuelle Fahrtrainer – ein prädiktives Verbrauchsassistenzsystem für schwere Nutzfahrzeuge

[116] Kortenkamp & Simmons (2008): Robotic Systems Architectures and Programming, S. 190ff

[117] Hohm et al. (2014): Automated Driving in Real Traffic: From Current Technical Approaches towards Architectural Perspectives

sich um eine verkehrsregelkonforme und sichere Ausführung der Manöver, indem er situationsgerechte Fahrfunktionen bestimmt und deren Ausführung überwacht. Die Bestimmung der konkreten Fahrzeugtrajektorien passend zu den geforderten Fahrfunktionen ist schließlich im Trajektorienplaner in der untersten Ebene (Bahaviour Layer) angesiedelt.

Weitere Architekturen aus dem Bereich der Fahrautomatisierung, die das Konzept der hierarchischen Ebenen aufgreifen, sind beispielsweise in den Arbeiten von Maurer[118] und Matthaei[119] zu finden.

Im Bereich der Systeme zur energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebs ist dem Autor augenblicklich kein Architekturkonzept bekannt, das den hierarchischen Ansatz in der beschriebenen Form aufgreift. Das lässt sich darauf zurückführen, dass im Unterschied zu Systemen für das hoch- und vollautomatisierte Fahren bei den bisher entwickelten Systemen zur energetischen Optimierung keine Planung und Auswahl von unterschiedlichen Verhaltensweisen betrachtet wird. Begründen lässt sich das damit, dass diese Systeme im Gegensatz zu Systemen für hochautomatisierte Fahren funktional nur sehr wenige Anwendungsfälle adressieren. So bestimmen die vorgestellten Systeme lediglich die Fahrweise in Längsrichtung (Geschwindigkeit) sowie die dazugehörige Betriebsweise/Betriebsstrategie (Getriebestufe, Leistungsaufteilung, etc.) innerhalb eines Fahrstreifens. Es findet jedoch auf einer höheren Hierarchieebene beispielsweise keine Bewertung statt, ob ein Fahrstreifenwechsel und die Fahrt auf einem benachbarten Fahrstreifen energieeffizienter wären (z. B. aufgrund von Rückstau im aktuellen Fahrstreifen).

Wenngleich eine rein hierarchieebenenbasierte Planung, Steuerung und Koordination von unterschiedlichen Fahrzeugverhalten zur Energieeffizienzsteigerung nicht bekannt ist, so gibt es konzeptionelle Überlegungen zur Arbitrierung von unterschiedlichen Funktionen zur Bestimmung einer Fahrweise. In der von Scheuch[120] vorgestellten Architektur bilden sog. Decision Units jeweils im Command und im Execution Layer das Rückgrat des Konzepts. Die Command Decision Unit vermittelt dabei zwischen den Vorgaben vom Fahrer, von Fahrerassistenzsystemen der Bahnführungsebene (z. B. ACC, LKAS (Lane Keeping Assist)) sowie dem Energiemanagement. Sie sorgt dabei für kontinuierliche Übergänge zwischen den unterschiedlichen Vorgaben und triggert die Ausgabe von Fahrerinformationen über das HMI. Ausgegeben wird ein Bewegungsvektor, der von der Execution Decison Unit entgegengenommen wird. Diese zweite Decision Unit bestimmt anschließend abhängig vom aktuellen Fahrzugstand sowie den

[118] Maurer (2000): Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen, S. 40ff

[119] Matthaei (2015): Wahrnehmungsgestützte Lokalisierung in fahrstreifengenauen Karten

[120] Scheuch et al. (2012): Simplified Architecture by Use of Decision Units, S.124

Assistenzsystemen auf Stabilisierungsbene die Ausgabegrößen für die Aktorik (Antriebsstrang, Bremse, Lenkung). Beide Decision Units arbitrieren dabei mit dem Ziel eines sicheren, effizienten und komfortablen Gesamtfahrzeugverhaltens. Zusammengefasst sind die Hauptmerkmale dieses Architekturkonzepts nach Scheuch die folgenden:

- Die Gesamtfahrzeugoptimierung wird durch eine situationsangepasste Arbitierung darstellt, die zwischen unterschiedlichen Vorgaben vermittelt. Eine gezielte energetische Optimierung, z. B. der Fahrweise liegt nicht im Fokus der Betrachtung und würde im vorstellten Ansatz lediglich als Eingangsgröße betrachtet werden (wie die anderen Assistenzsysteme).
- Die Trennung der Arbitrierung in zwei Decision Units erfolgt nach funktionalen Aspekten (Command und Execution) und reduziert in Folge die Komplexität bzw. Wechselwirklung der einzelnen Bestandteile und steigert die Modularität.

Auch der Vorschlag für eine generische Funktionalstruktur (zur energiebasierten Antriebsstrangregelung von Hybridfahrzeugen) von Radke et al.[121] (Abbildung 2-6) weist keine Hierarchisierung von Funktionen zur übergeordneten Planung unterschiedlicher Systemverhalten und untergeordneten Umsetzung auf. Er beschreibt jedoch implizit eine Hierarchie im Sinne der Bestimmung von optimalen Fahr- und Betriebsweisen, indem Planungsfunktionen in die hintereinanderliegenden Bereiche Motion Planning & Control, Vehicle Coordination und Sequence Control & Actuation angesiedelt werden. Während im Bereich des Motion Planning & Control die Funktionen zur Bestimmung der optimalen Fahrweise (und auch die Fahrervorgaben) platziert sind, beinhaltet der Bereich Vehicle Coordination die Funktionen zur Arbitrierung dieser Fahrweisenvorgaben (Vehicle Request Coordination) und zur Bestimmung der energieoptimalen Betriebsstrategien für Antriebsstrang, elektrischen Nebenaggregate und des Thermomanagement.

[121] Radke et al. (2014): Connected Energy-Based Powertrain Control, S. 1401-1412

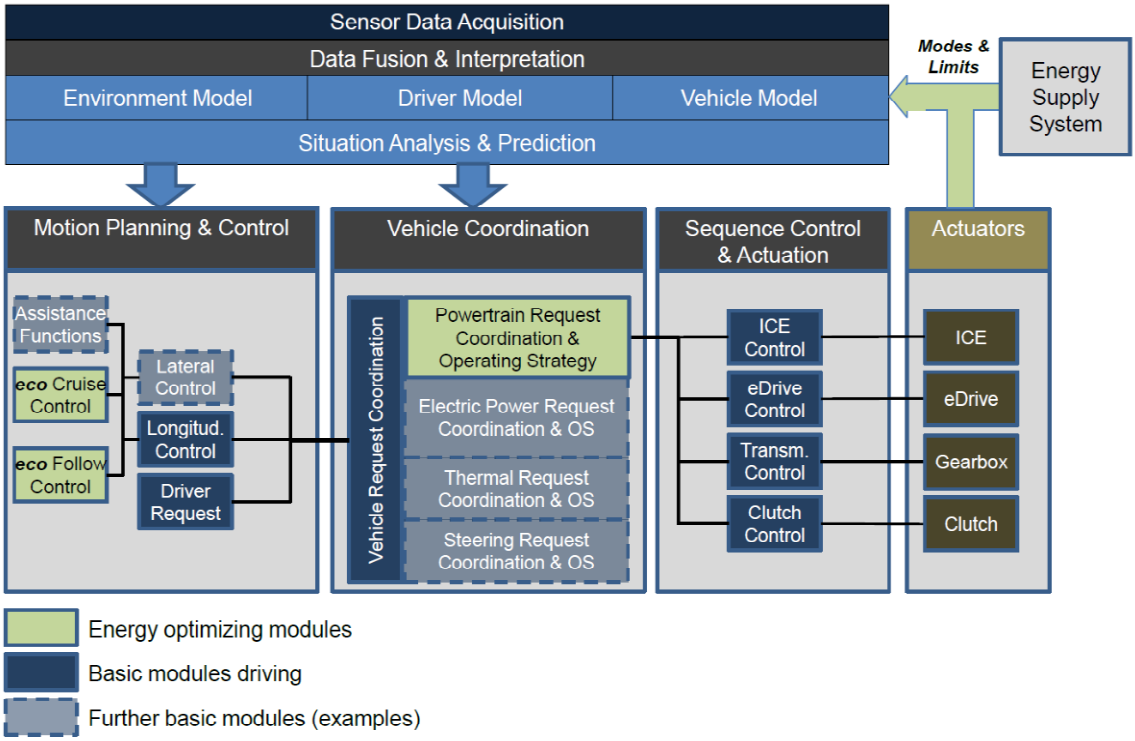

Abbildung 2-6: Generische Funktionalstruktur zur energiebasierten Antriebsstrangregelung nach Radke et al.[122]

Zusammengefasst sind die Hauptmerkmale dieses Architekturkonzepts nach Radke die folgenden:

- Die Hierarchie der vorgestellten generischen Funktionalstruktur entspricht den Ebenen des Fahrbetriebs (Navigation, Fahrweise, Betriebsweise, Betriebsstrategie), wobei die Ebene der Navigation nicht berücksichtigt wird.
- Die Unterteilung in die funktional zusammenhängenden Ebenen des Fahrbetriebs begünstigt die Modularisierung des Systems und gewährleistet schlanke Schnittstellen zwischen den Ebenen.
- Die Prämisse der Nutzung von zwei Ebenen (Motion Planning & Control und Vehicle Coordination) für die energetische Optimierung bedeutet, dass Fahrweise und Betriebsweise/Betriebsstrategie hintereinander optimiert werden anstatt integriert in einer ebenenübergreifenden Optimierung.

Das Konzept, bei welchem die unteren Ebenen für die Ausgestaltung und Umsetzung der Vorgaben der höheren Ebenen zuständig sind, findet auch im Bereich von Hybridstrategien Verwendung. So wird die strukturierte Betriebsstrategie nach Bier et al.[123] grundsätzlich in drei Ebenen unterteilt. Während die erste Ebene (Energiemanagement)

[122] Entnommen aus Radke et al. (2014): Connected Energy-Based Powertrain Control, S. 1405

[123] Bier et al. (2012): Strukturierte Betriebsstrategie für Hybridfahrzeuge, S. 94-99

für die Berechnung von Betriebsmodi sowie die quasistationäre Aufteilung der Zugkraftanforderung verantwortlich, wird in der mittleren Ebene (Dynamikansteuerung) die grundsätzliche Lastaufteilung zwischen den Aggregaten in die Steuersignale für die einzelnen Aggregatsteuergeräte, Kupplung und Getriebe übersetzt. Auf unterster Ebene werden die Steuersignale der Aggregate in Steuersignale für die einzelnen Aktoren durch die konventionellen Aggregatsteuergeräte (z. B. Motorsteuergerät) gewandelt. Diese Struktur aufgreifend schlägt Kluin[124] die Erweiterung um eine zusätzliche oberste Ebene vor, die eine vorausschaubasierte Selbstoptimierung der Fahr- und Betriebsweise/Betriebsstrategie dem Energiemanagement hierarchisch voranstellt bzw. es teilweise ersetzt.

2.5.3 Modularität und Skalierbarkeit

Das im vorangegangenen Abschnitt diskutierte Architekturmuster der hierarchischen Ebenen stellt bereits ein Vorgehen zur Modularisierung eines Systems dar. Über die Aufteilung der Ebenen kann gestaltet werden, wie deutlich die Ebenen voneinander entkoppelt sind. Das Ziel sollte dabei sein, die Ebenen maximal voneinander zu entkoppeln, sodass Modifikationen in einer Ebene nach Möglichkeit die anderen Ebenen nicht betreffen. Dieser Ansatz ist auch als Prinzip der losen Kopplung bekannt, das besagt, dass die Kopplung der zwischen den Bausteinen (hier Ebenen) so gering wie möglich gehalten werden sollte[125].

Im Hinblick auf Skalierbarkeit von Funktionen ist es bei Architekturen, die nach den Ebenen des Fahrbetriebs (Navigation, Fahrweise, Betriebsweise, Betriebsstrategie) modularisiert sind, denkbar, einzelne Ebenen zu deaktivieren. So wäre es beispielsweise möglich, bei einem fahr- und betriebsweisenoptimierenden System die Ebene mit der Fahrweisenoptimierung zu deaktivieren, wenn eine hierfür benötigte Vorausschauinformationsquelle nicht zur Verfügung steht. Dieser Ansatz der ebenenbasierten Skalierung von Funktionen wird jedoch in den bekannten Veröffentlichungen nicht näher betrachtet.

Die Nutzung von Modularität zur Erreichung von Skalierbarkeit von Funktonalitäten wird explizit in der modularen Funktionsarchitektur für adaptives und vorausschauendes Energiemanagement in Hybridfahrzeugen von Wilde[126] dargestellt. Hauptmerkmal der modularen Funktionsarchitektur ist ihre Plug-and-Play-Eigenschaft. Diese erlaubt es,

[124] Kluin (2015): Durchgängige modellbasierte Methoden zur Entwicklung vernetzter Betriebsstrategien für ottomotorische Hybridantriebe, S. 67

[125] Vgl. hierzu eine Beschreibung grundlegender Architekturprinzipen in Kapitel 3.4.2

[126] Wilde (2009): Modulare Funktionsarchitektur für adaptives und vorausschauendes Energiemanagement

dass sich ein auf der Architektur basierendes System automatisch an das im Fahrzeug zur Verfügung stehende Sensorangebot anpasst und darauf abgestimmte Funktionen bereitstellt. Diese Plug-and-Play-Fähigkeit wird dadurch erreicht, dass Beobachtermodule die verfügbaren Sensorinformationen beobachten und basierend auf dem Informationsangebot dann Funktionen aktivieren/deaktivieren bzw. fehlende Informationen mit neutralen Werten ersetzten. In diesem Fall läuft eine Funktion zwar, zeigt jedoch keine Wirkung. Diese architektonische Ansatz bietet den Vorteil, dass ein und die dieselbe Systemimplementierung (d.h. Softwarepaket) in unterschiedlichsten Fahrzeugen eingesetzt werden kann; die Energiefunktionen werden automatisch in Abhängigkeit des Sensorangebots aktiv. So wird eine hohe Kompatibilität mit einer breiten Fahrzeugflotte zu erreicht. Angemerkt sei jedoch, dass die Funktionalitäten auf Fahrzeugdaten (Kennwerte (z. B. Masse) und Kennfelder) angewiesen sind, die fahrzeugindividuell sind und daher bei einem Fahrzeugwechsel dem System mitgeteilt werden müssen.

2.5.4 Fazit

Die in den betrachteten Veröffentlichungen vorgestellten Architekturüberlegungen für Assistenzsysteme zur energetischen Optimierung greifen bereits den Aspekt der Strukturierung und Modularisierung von Funktionen mittels Ebenen auf. Neben der Grobstrukturierung in Informationsbereitstellung, -verarbeitung und -ausgabe wird u.a. bei Radke die Informationsverarbeitung weiter unterteilt entsprechend den Ebenen des Fahrbetriebs (Fahrweise, Betriebsstrategie). Die Architekturkonzepte berücksichtigen dabei weder die Integration von Funktionen auf der Navigationsebene noch eine übergeordnete Koordination mehrerer Optimierungsfunktionen. Bei mehreren Funktionen, die die Fahrweise bestimmen können, wird mittels Arbitrierungselementen (Coordination, Decison Units) über den Zugriff entschieden.

Diese analysierten architektonischen Muster werden in Kapitel 5 erneut aufgegriffen und hinsichtlich ihrer Eignung im Rahmen der Entwicklung der funktionalen Referenzarchitektur bewertet.

3 Anforderungsanalyse

Die Entwicklung der in dieser Arbeit vorgestellten funktionalen Referenzarchitektur basiert zum einen auf der Analyse von funktionalen Anforderungen, die von Systemen zur energetischen Optimierung zu erfüllen sind und zum andern auf nichtfunktionalen Anforderungen, die aus der Nutzung der Architektur als Referenz resultieren. Die Grundlage zur Ableitung dieser funktionalen und nichtfunktionalen Anforderungen bildet die Identifikation von Anwendungsszenarien, die einerseits Szenarien zur energetischen Optimierung und anderseits Systementwicklungsszenarien enthält. Als Hilfsmittel zur Ableitung und Strukturierung der funktionalen Anforderungen wird eine Ontologie erstellt, die Vorausschauinformationen ordnet und strukturiert.

3.1 Anwendungsszenarien

3.1.1 Basisszenarien zur energetischen Optimierung

Basisszenarien zur energetischen Optimierung beschreiben die mögliche Handlungschoreographie zwischen einem beteiligten Optimierungssystem, einem ausführenden System (Fahrer oder Automatisierung) und dem zugrundeliegenden Fahrzeug. Grundlage für die Identifikation der möglichen Anwendungsszenarien bildet dabei die eingeführte Strukturierung des Fahrbetriebs in Navigation, Fahrweise, Betriebsweise und Betriebsstrategie. Auf Grundlage dieser Strukturierung und der der allgemeinen Ansätze zur energetischen Optimierung des Fahrbetriebs werden die Basisszenarien beschrieben.

Ein Basisszenario wird konkretisiert durch die Zuweisung eines ausführenden Elements. Ein ausführendes Element ist für die Umsetzung der Optimierungsergebnisse verantwortlich. Die beiden möglichen Merkmalsausprägungen sind hierbei zum einen der Fahrer in seiner Funktion als Regler und zum anderen die Regelungs-/Steuersysteme im Fahrzeug.

Ziel dieses Vorgehens ist es einen Überblick über die Interaktionsmöglichkeiten zwischen Optimierungssystem und Ausführungsinstanz zu erlagen, um daraus eine umfassende Übersicht an denkbaren funktionalen Anforderungen ableiten zu können.

Im Gegensatz zu einer Entwicklung für ein konkretes System stellen die hier betrachteten Basisszenarien die Gesamtmenge an möglichen Szenarien dar. Für die Entwicklung von konkreten Systemen werden jedoch für gewöhnlich spezifische Anwendungsszenarien betrachtet, in welchen sich das zu entwickelnde System bewähren bzw. einen Nut-

zen bringen muss (z. B. energetische Optimierung der Annäherung an deine Lichtzeichenanlage). Dies entspricht einer klassischen Anwendungsfallbetrachtung, die beschreibt, was ein System/eine Anwendung aus Sicht eines Nutzers leisten soll[127]. In diesem Betrachtungskontext können solche spezifischen Anwendungsfälle eine Untermenge der möglichen Anwendungsszenarien dar, wie sie im Folgenden betrachtet werden. Tabelle 3-1 beinhalte die Übersicht der Basisszenarien.

Tabelle 3-1: Basisszenarien zur energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebs

Klasse	**Basis-Anwendungsszenario**	**Kurzbeschreibung**	**Mögliche Ausführendes Element des Optimierungsergebnisses**
Navigation	Routenplanung (inkl. Startzeitpunkt)	Auf Grundlage aktueller und prädizierter energierelevanter Streckeninformation plant das System vor Fahrtbeginn eine energieeffiziente Route (inkl. Startzeitpunkt) und gibt diese aus	Fahrer Manöverplanung eines autonomen Fahrzeuges
	Routenanpassung	Auf Grundlage aktueller und prädizierter energierelevanter Streckeninformation passt das Systeme während der Fahrt die gewählte Route an	Fahrer Manöverplanung eines autonomen Fahrzeuges
	Fahrstreifenplanung	Auf Grundlage aktueller und prädizierter Vorausschauinformationen bestimmt das System einen energieoptimalen Zielfahrstreifen	Fahrer Manöverplanung eines autonomen Fahrzeuges
Fahrweise	Optimierung Fahrprofil (kontinuierlich / einzelmanöverlosgelöst)	Auf Grundlage aktueller und prädizierter Vorausschauinformationen berechnet das System ein energieoptimales Geschwindigkeitsprofil mitsamt Betriebsweise bzw. Betriebsstrategie für den betrachteten Optimierungshorizont	Fahrer Längsführungssystem
	Optimierung Fahrprofil (diskontinuierlich / manöverbezogen)	Auf Grundlage aktueller und prädizierter Vorausschauinformationen berechnet das System energieoptimale Fahrstrategien (Verzögern, Beschleunigung, Konstantfahrt) und Betriebsweisen bzw. Betriebsarten (z. B. Segeln, Schubbetrieb) für vorausliegende Fahrsituationen	Fahrer Längsführungssystem

[127] Vgl. Fiedler (2004): Use Cases

Betriebsweise	Optimierung Betrieb Nebenfunktionen (Beeinflussung Nutzenergiebedarf)	Auf Grundlage aktueller und prädizierter Vorausschauinformationen berechnet das System energieoptimale Betriebstrajektorien für Nebenfunktionen (z. B. Betrieb Klimaanalage und Motorkühlsystem)	Fahrer Klimatisierungsregelsystem
	Optimierung Betrieb Kennungswandler (Arbeitspunktoptimierung)	Auf Grundlage aktueller und prädizierter Vorausschauinformationen berechnet das System energieoptimale Betriebstrajektorien für Kennungswandler (z. B. Schaltprogramme)	Fahrer Getriebesteuerung
Betriebsstrategie	Optimierung Energiemanagement	Auf Grundlage aktueller und prädizierter Vorausschauinformationen berechnet das System den optimalen Energiefluss im Antriebsstrang	Antriebsstrangregelsystem

3.1.2 Entwicklungsszenarien

Im Gegensatz zu den Basisszenarien zur energetischen Optimierung befassen sich die Entwicklungsszenarien nicht mit der Nutzung des Systems im Fahrbetrieb aus Sicht eines Nutzers, sondern mit der Nutzung der Referenzarchitektur in der Entwicklung.

Die Haupttätigkeiten, die in einem Entwicklungsprozess durchlaufen werden, sind dabei die zum einen die Entwicklung eines Systems und zum anderen das Testen der Entwicklungsergebnisse. Aus Entwicklersicht lassen sich daher die folgenden, architekturrelevante Szenarien benennen:

- **Szenario 1**: Ein Entwickler möchte im Falle von Neuentwicklungen konkrete funktionale Systemarchitekturinstanzen aus der Referenzarchitektur ableiten können (Initiale Entwicklung).
- **Szenario 2**: Ein Entwickler möchte auf konkreten funktionalen Systemarchitekturinstanzen basierende Systeme effizient ändern können (Änderungsentwicklung). Unter Änderungen wird dabei das Hinzufügen von neuen Features sowie das Ändern und Entfernen von bestehenden Features verstanden[128]
- **Szenario 3**: Ein Entwickler möchte auf konkreten funktionalen Systemarchitekturinstanzen basierende Systeme effizient testen können (Testen). Ziel dabei ist zu prüfen, ob bestimmte Eigenschaften eines Systems vorliegen oder nicht. Eine Architektur sollte das Testen dabei in der Art unterstützen, dass die zu erlangenden Aussagen mit minimalem Aufwand gewonnen werden können.

[128] Vgl. Bass et al. (2012): Software Architecture in Practice, S. 117

Die Entwicklungsszenarien dienen im Folgenden zum einen zur Motivation und Ableitung von nichtfunktionalen Anforderungen bzw. Qualitätsattributen und zum andern als Grundlage für die Definition von konkreten Prüfszenarien, anhand derer die Qualitätsattribute der Referenzarchitektur später diskutiert werden.

3.2 Ontologie von Umfeldvorausschauinformationen

Vorausschauende Systeme zur energetischen Optimierung des Fahrbetriebs benötigen Informationen, die beschreiben, was in einem örtlichen und zeitlichen Abstand um das Fahrzeug herum passiert bzw. passieren wird. Erst auf Grundlage dieser Informationen ist es den Systemen möglich, im Sinne eines energieeffizienten Fahrbetriebs vorausschauend zu planen und zu handeln. Dies ist vergleichbar mit einem Fahrer, der für einen energieeffizienten Fahrbetrieb möglichst weit vorausschaut und das Verkehrsgeschehen antizipiert, um seine Routenwahl sowie Fahr-/Betriebsweise abhängig vom erwarteten Umfeldzustand zu gestalten.

Die Art und Reichweite der energetischen Optimierung durch ein System, d.h. wie der Fahrbetriebs optimiert wird, hängt dabei von der Art und Reichweite der verfügbaren Vorausschauinformationen ab. Die Charakterisierung einer Vorausschau erfolgt daher anhand der Kriterien Vorausschauweite (Vorausschauhorizont), Vorausschauinformation und Gewissheit der Vorausschauinformationen. In den folgenden Abschnitten werden zunächst diese Kriterien näher beschrieben um dann anhand derer eine zweckmäßige Klassifikation von Vorausschau zu bestimmen.

3.2.1 Definition Vorausschau

Unter Vorausschau wird die Informationserfassung und -bereitstellung in einem vorausliegenden Umgebungsbereich verstanden. Die Vorausschau umfasst dabei das gesamte Straßennetzwerk, einen elektronischen Horizont und das direkte Fahrzeugumfeld. Das Straßensystem wird repräsentiert durch ein Netzwerk aus Kanten und Knoten, das als Grundlage für die Routenplanung dient. Eine Route entspricht einem gewählten Pfad durch dieses Netzwerk und wird durch eine Aneinanderreihung von Kanten und Knoten repräsentiert. Die Vorausschau entlang dieser voraussichtlichen Route, entweder über einzelne bis mehrere Teilabschnitte oder über die gesamte Route bis zum Ziel, wird als elektronischer Horizont bezeichnet. Dieser beinhaltet Informationen zum vorausliegenden Straßennetz und beschreibt z. B. Straßenklasse, Geschwindigkeitsbeschränkungen,

Steigungen und Krümmungen[129]. Ist eine Route nicht bekannt, beschreibt der Most Probable Path (MPP) den Fahrweg, der mit höchster Wahrscheinlichkeit befahren werden wird.

3.2.2 Vorausschauhorizont

Eine Vorausschau auf Ebene des gesamten Straßennetzes oder entlang der voraussichtlichen Route kann ortsbezogen, zeitbezogen oder kombiniert erfolgten. Bei einer reinen ortsbezogenen Vorausschau liegen Informationen für alle Orte im Straßennetz bzw. entlang der Route vor, jedoch nur für den augenblicklichen Zeitpunkt (z. B. aktuelle Verkehrslage entlang der Route). Im Gegensatz dazu liefert eine rein zeitbezogene Vorausschau Informationen für zukünftige Zeitpunkte, jedoch nur für bestimmte feste Orte (z. B. zukünftiger Zustand einer LZA). Eine kombinierte Vorausschau kann dementsprechend Informationen für einen beliebigen einen Ort zu einem zukünftigen Zeitpunkt zur Verfügung stellen (z. B. zukünftige Verkehrslage oder Position einzelner Verkehrsteilnehmer). Für Systeme zur energetischen Optimierung sind in erster Linie die Vorausschauinformationen relevant, die durch den Zusammenhang Vorausschauweite und dem erwarteten Eintreffzeitpunkt an diesem Ort dargestellt werden.

Diese von der Reisegeschwindigkeit abhängige zeitlich-örtliche Vorausschauweite wird im Folgenden als Vorausschauhorizont bezeichnet. Qualitativ lässt sich der Vorausschauhorizont unterteilen in einen nahen, mittleren und einen fernen Horizont:

Tabelle 3-2: Übersicht Vorausschauhorizonte

Horizont	Örtliche Vorausschauweite
Fern	Komplettes Wegenetzwerk bis zum Ziel (digitale Karte)
Mittel	Über Sichtweite der Onboard-Sensorik hinaus (eHorizon aus digitaler Karte und Kommunikationssysteme)
Nah	Sichtweite der Onboard-Sensorik (Kamera, Radar, Lidar,…)

Die Unterteilung ist zweckmäßig, da von fern bis nah die Menge und Güte der Vorausschauinformation zunimmt. Die umfangreichsten, jedoch mit der kürzesten Reichweite versehenen Vorausschauinformation stehen folglich im Nahbereich zur Verfügung, da hier neben Informationen aus der digitalen Karte und Kommunikationssystemen auch die Informationen aus der Onboard-Sensorik bereitgestellt werden können.

[129] Kleine-Besten et al (2015):Navigation und Verkehrstelematik, S. 1065

3.2.3 Vorausschauinformationen

Informationen, die durch die Vorausschau bereitgestellt werden, können gruppiert werden in verkehrsrelevante Informationen und Informationen zu Umweltbedingungen (z. B. Wetterinformationen). Verkehrsrelevante Informationen beschreiben die Bewegung und die Eigenschaften von Verkehrsmitteln sowie die Zustände und Eigenschaften der zugrundeliegenden Verkehrsinfrastruktur. Die Verkehrsinfrastruktur besteht u.a. aus den Teilelementen Verkehrswege, Leitsysteme sowie rechtliche Regelsysteme, wie der Straßenverkehrsordnung. Die Verkehrsinfrastruktur bildet somit die Grundlage um mittels Verkehrsmitteln Verkehr darstellen zu können, um Personen und Güter zu bewegen[130].

Neben Informationen zur Verkehrsinfrastruktur und den sich darauf bewegenden Verkehrsmitteln, kann die Vorausschau auch einzelobjektunabhängige Informationen enthalten, die den Zustand auf den Verkehrswegen, d.h. die Verkehrslage, beschreiben. Derartige Informationen sind beispielsweise die Verkehrsdichte/-geschwindigkeit oder Informationen zu Staus oder Gefahrenstellen auf Elementen des Straßennetzwerkes bzw. entlang der Route.

Jede der drei Vorausschauinformationsgruppen (Verkehrsinfrastruktur, Verkehrsmittel, Verkehrsinformation) enthält Elemente, die durch Attribute gekennzeichnet werden. Die Attribute, die jedes Element beschreiben, sind Positionsinformation und Zustandsinformationen. Während Positionsinformationen angeben, wo sich ein Element befindet und wo es endet bzw. welche Ausdehnung es hat, beschreiben Zustandsinformationen die relevanten Zustände der Elemente. Relevante Zustände sind z. B. die Phase einer LZA, die Steigung eines Verkehrswegelements oder die Geschwindigkeit/Beschleunigung eines Verkehrsmittels.

Aus Sicht einer energetischen Betrachtung stellen diese Vorausschauinformationen die Grundlage für die Bestimmung der für die Energiebetrachtung relevanten Einflusselemente dar. Die für die energetische Betrachtung relevanten Einflusselemente sind dabei die Steigung bzw. die Höhe über Meeresspiegel, die Grenzgeschwindigkeiten bedingt z. B. durch Verkehrszeichen, die Objekteigenschaften der Verkehrsmittel (in erster Linie Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung) sowie die Verkehrslage.

- **Höhen-/Steigungsprofil**: Über das vorausliegende Höhen-/Steigungsprofil bestimmen sich der zu überwindende Steigungswiderstand bzw. die Änderung der potentiellen Energie. Diese Information leitet sich durch das Wissen über die geometrische Gestaltung des Verkehrsinfrastrukturelements Verkehrsweg ab.

[130] Ammoser & Hoppe (2006): Glossar Verkehrswesen und Verkehrswissenschaften, S. 27

- **Grenzgeschwindigkeiten**: Grenzgeschwindigkeiten bzw. deren Änderungen legen die maximal erlaubte Fahrgeschwindigkeit und somit die maximale kinetische Energie fest. Die Grenzgeschwindigkeiten leiten sich aus Elementen der Verkehrsführung (Verkehrszeichen, Lichtsignalanlagen) und der Gestaltung der Kurvenradien der Verkehrswege ab. Insbesondere das Wissen über vorausliegende Änderungen der Grenzgeschwindigkeit z. B. bedingt durch ein Verkehrszeichen ist relevant, da aus dieser Information die Änderung an kinetische Energie bestimmt werden, die aufgebracht oder abgebaut werden muss um sich der Grenzgeschwindigkeit anzunähern.
- **Objekteigenschaften von Verkehrsmittel**: Aus dem Wissen über die Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung der vorausliegenden Verkehrsmittel und einer prädizierten Trajektorie ergeben sich aus Sicht des Egofahrzeuges Einschränkungen der Geschwindigkeit bzw. des Aufenthaltsortes. Diese stellen dynamische Randbedingungen für die energetische Fahrprofiloptimierung dar.
- **Verkehrslage**: Verkehrslageinformationen können genutzt werden, um zum einen eine erwartete Änderung der Grenzgeschwindigkeit (z. B. Stauende in 500 m) und zum anderen ein erwartetes Geschwindigkeitsprofil (Häufiges Anfahren und Abbremsen bedingt durch Stau) zu schließen. Für eine konkrete Fahrprofiloptimierung sind diese einzelobjektlosgelöste Informationen jedoch nicht ausreichend, allerdings sind beispielsweise Vorkonditionierungsfunktionen für Antriebsstrang denkbar, wie die vorausschauende SoC-Erhöhung beim Hybridfahrzeug, um in der Stausituation möglichlist lange elektrisch fahren zu können.

3.2.4 Gewissheit von Vorausschauinformationen

Für jedes Attribut aus der Menge der Vorausschauinformationselemente können die Attributwerte entlang des Vorausschauhorizontes exakt bzw. mit einer gewissen Unsicherheit bekannt sein. Bei exakt bekannten Attributwerten wird von deterministischen Aussagen gesprochen während bei unsicheren Attributwerten die Aussagen probabilistisch sind, d.h. mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit belegt sind.

Deterministische Aussagen liegen vor, wenn die Werte für Attribute, wie z. B. Position, Geschwindigkeit, Steigung, etc. an den betrachteten Vorausschaupunkten (sowohl örtlich als auch zeitlich) genau bekannt sind. Der Fall einer reinen örtlichen Vorausschau für den aktuellen Zeitpunkt entspricht dabei dem aktuellen Umfeldzustand, wie er durch Sensorik gemessen, mittels Kommunikation übertragen und aus einer digitalen Karte ausgelesen wird. Da diese Informationen das Umfeld zum aktuellen Zeitpunkt abbilden, ist die Unsicherheit hinsichtlich der Attributwerte am geringsten.

Kommt neben der örtlichen Vorausschau die zeitliche Vorausschau hinzu, hängt die Unsicherheit davon ab, ob die betrachteten Objekteattribute sich mit der Zeit ändern können. Objektattribute, deren Attributwerte zeitlich unverändert sind, werden als konstant bezeichnet. Konstante Objektattribute sind in erster Linie der Straßentyp und die geometrische Gestaltung (Steigung, Kurvenradius, Querneigung) sowie die Position von stationären Elementen der Verkehrsführung, wie Verkehrszeichen und Lichtzeichenanlagen. Andere Attribute, wie das aktuell angezeigte Lichtzeichen und das aktuelle Verkehrszeichen (bei Wechselverkehrszeichenanlagen) stellen hingegen zeitlich veränderliche Objektattribute dar.

Bei zeitlich veränderlichen Objektattributen hängt die Unsicherheit hinsichtlich der zukünftigen Attributwerte davon ab, ob das Verhalten deterministisch ist oder unter der Nutzung von Annahmen prädiziert wird. Im Falle von deterministischem Verhalten können die zukünftigen Objektzustände bzw. Objektattribute systemextern oder -intern bestimmt und anschließend für eine Vorausschau nutzbar gemacht werden. Beispiele hierfür sind Lichtzeichenanlageumschaltzeiten, die entweder kommunikationsbasiert von extern übermittelt werden können oder im Falle von festen Schaltprogrammen auch intern im Ego-Fahrzeug gespeichert sein können.

Ist das Verhalten der zeitlich veränderlichen Umfeldelemente nicht determiniert, so müssen die zukünftigen Werte der relevanten Objektattribute per Schätzung prädiziert werden. Die Grundlage für die Prädiktion bilden dabei aktuell gemessene bzw. kommunizierte Werte für Objektattribute sowie Modellannahmen über das Verhalten der Umfeldelemente. Mit wachsender Prädiktionszeit steigen dabei die Aussageunsicherheiten hinsichtlich des Verhaltens an.

3.2.5 Klassifikation

Aus der Kombination der Kriterien Vorausschauweite (Vorausschauhorizont), Informationsinhalt und Gewissheit der Informationen lässt eine Vielzahl unterschiedlicher Vorausschaukonzepte ableiten. Zur Klassifizierung der Konzepte, die technologisch darstellbar sind, wird eine Ordnungsstruktur basierend auf den Begriffen Szenerie, Szene und Situation benutzt. Diese ist angelehnt an die Ontologie zur Generierung von Test und Use Case Katalogen für die assistierte und autonome Fahrzeugführung nach Geyer et al.[131].

Szenerie: Sammlung der Elemente mit konstanten Attributen, wie Straßentyp/Straßengeometrie und Verkehrszeichen. Diese Elemente bilden den statischen Rahmen einer Szene.

[131] Geyer et al. (2013): Concept and Development of a Unified Ontology for Generating Test and Use Case Catalogues for Assisted and Automated Vehicle Guidance

Szene: Eine Szene besteht aus der Szenerie und dynamischen Elementen. Dynamische Elemente sind durch zeitlich veränderbare Attribute gekennzeichnet, wie beispielsweise die Lichtsignalphase, die Position eines Verkehrsmittels oder die Durchschnittsgeschwindigkeit auf einem Straßensegment. Innerhalb einer Szene ändern diese dynamischen Elemente ihren Zustand.

Situation: Eine Situation beschreibt den aktuellen Zustand, der durch ein zugewiesenes Handlungsschema definiert ist. Beispiele für Situationen sind ein Fahrstreifenwechsel bzw. das Ein-/Ausscheren eines vorausfahrenden Fahrzeugs oder Stopp-Go-Verkehr.

Tabelle 3-3: Vorausschauklassen

Klasse	**Voraus-schauweite**	**Vorausschauinformation**	**Gewissheit**
Szenerie	Fern (*bezogen auf das Straßennetz)* Mittel-fern (*bezogen auf den eHorzion; abhängig ob Route oder MPP bekannt ist)*	Konstante Daten bzgl. Verkehrsinfrastruktur *(z. B. Straßentyp/Straßengeometrie und Verkehrszeichen)*	Gegenwärtig: Hoch Zukünftig: Hoch
Szene *fern*	Fern	Verkehrsinformationen *(bezogen auf das Straßennetz, z. B. Durchschnittsgeschwindigkeit auf Straßensegment)*	Gegenwärtig: Hoch Zukünftig: Prädiktionsabhängig
Szene *nah*	Nah	Verkehrsmittel *(z. B.Abstand, Geschwindigkeit)* Verkehrsinfrastruktur *(z. B.Verkehrszeicheninhalt, aktuelle Lichtzeichenphase, Steigung)*	Gegenwärtig: Hoch Zukünftig: mit Prädiktionsweite zunehmend probabilistisch
Szene *nah+mittel*	Mittel	Verkehrsinfrastruktur *(z. B.Lichtzeichenphasen)* Verkehrsmittel *(z. B. Position, Zustand)* Verkehrsinformationen *(bezogen auf den eHorzion; z. B Stauende, Länge Warteschlage an LZA)*	Gegenwärtig: Hoch Zukünftig: mit Prädiktionsweite zunehmend probabilistisch

Situation	Nah - mittel	Verkehrsmittel *(z. B. Abstand, Geschwindigkeit + Verhalten und Relation zur Verkehrsinfrastruktur (z. B. welcher Fahrstreifentyp wird aktuell befahren))* Verkehrsinformation *(z. B. Fahrmuster des vorausfahrenden Verkehrs)* Verkehrsinfrastruktur *(z. B. Freiraum für einen Fahrstreifenwechsel)*	Gegenwärtig: Hoch Zukünftig: Hoch (Situationsverständnis fließt in Prädiktion ein)

Im Gegensatz zu den weiteren Vorausschauklassen, ist das Hauptmerkmal der Vorausschauklasse **Szenerie** die Bereitstellung von konstanten Vorausschauinformationen, die kennzeichnend für die Verkehrsinfrastruktur sind. Aufgrund des zeitinvarianten Verhaltens der betrachtenden Attribute ist keine Prädiktion erforderlich und die Aussagen zu den zukünftigen Attributswerten haben eine hohe Bestimmtheit.

Die Vorausschauklasse **Szene fern** enthält Vorausschaukonzepte, die dynamische Verkehrsinformationen bezogen auf das Straßennetzwerk bereitstellten. Diese Informationen erweiterten das konstante Szenariowissen aus der ersten Klasse um dynamische, nicht einzelobjektbezogene Informationen, wie beispielsweise Durchschnittsgeschwindigkeit auf einem Straßensegment. Die Vorhersage des zukünftigen Verhaltens ist prädiktionsgestützt und orientiert sich z. B. an historischem Wissen zu tageszeitabhängigem Verkehr.

Die Vorausschaukonzepte der Klasse **Szene nah** stellen Informationen zu Verkehrsmitteln und zur Verkehrsinfrastruktur im direkten Fahrzeugumfeld, das bis zur Sichtweite der On-Board-Sensorik reicht, bereit. Insbesondre hinsichtlich der umgebenden Verkehrsmittel müssen die Aussagen zu Attributen, wie Abstand und Geschwindigkeit eine hohe Sicherheit haben, da auf Grundlage dieser Informationen unmittelbar Fahrzeugreaktionen in Form von Beschleunigungen und Verzögerungen generiert werden (z. B. in einem Eco-ACC-System). Nichteinzelobjektbezogene Verkehrsinformationen werden in diesem Nahbereich nicht berücksichtigt.

Die Klasse **Szene nah+mittel** kombiniert Vorausschaukonzepte für den Nahbereich mit Vorausschaukonzepten für den mittleren Vorausschauhorizont. Der Hauptunterschied zum Nahbereich besteht darin, dass die Vorausschauinformationen für eine deutlich längere Vorausschauweite, die außerhalb des Sichtbereiches des On-Board-Sensorik liegt, bereitgestellt werden. In dieser Vorausschauweite stehen auch nichteinzelobjektbezogene Verkehrsinformationen, wie Stauenden oder die Längen von Warteschlangen an Lichtzeichenanlagen bereit. Mit Zunahme der Vorausschauweite steigt auch die

Prädiktionsweite und somit die Unschärfe hinsichtlich der zukünftigen Attributswerte, wie Positionen und Zuständen.

Die Prädiktionsqualität hinsichtlich Umfeldobjekten lässt sich durch die Nutzung von Situationswissen erhöhen. Ist beispielsweise bekannt, dass sich ein Fahrzeug auf einem demnächst endenden Fahrstreifen befindet, so steigt die Wahrscheinlichkeit für einen Fahrstreifenwechsel dieses Fahrzeuges. Vorausschaukonzepte in der Klasse **Situation** berücksichtigen diese Relationen zwischen den dynamischen und statischen Elementen im Umfeld (Verkehrsmittel und Verkehrsinfrastruktur), erkennen daraus eine spezifische Situation und nutzen dieses Wissen für die Prädiktion.

3.3 Funktionale Anforderungen

Grundsätzlich beschreiben funktionale Anforderungen, welche Leistungen ein System erbringen soll. Für die Spezifikation einer funktionalen Systemarchitektur bilden sie die Grundlage, da sie die Ursache für die in der Systemarchitektur festgelegten Funktionen darstellen. Das Ziel ist daher, die funktionalen Anforderungen in den Architekturentwurf zu überführen.

3.3.1 Vorgehen zur Ableitung funktionaler Anforderungen

Zur Bestimmung konkreter funktionaler Anforderungen an Systeme zur energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebs werden die Basisszenarien zur energetischen Optimierung den unterschiedlichen Vorausschauklassen gegenübergestellt. Für jede Kombination aus Basisszenario und Vorausschauklasse können anschließend mögliche Funktionsausprägungen abgeleitet werden. Diese Funktionsausprägungen beschreiben, welche konkrete Optimierung in einem Basisszenario mit welcher Vorausschauinformation funktional denkbar bzw. nicht plausibel ist. Das Ergebnis dieses Vorgehens stellt eine Art Funktionslandkarte für vorausschaubasierte Systeme zur energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebs dar. Die einzelnen Funktionsausprägungen entsprechen funktionalen Anforderungen, wie sie im Architekturentwurf zu berücksichtigen sind.

3.3.2 Funktionale Anforderungen an eine funktionale Referenzarchitektur für Systeme zur energetischen Optimierung des Fahrbetriebs

Anforderungen an Optimierungsfunktionen

Die funktionalen Anforderungen (FA) hinsichtlich Optimierungsfunktionen leiten sich der Gegenüberstellung von Basisszenarien und Vorausschauklassen ab. Die Lokalisierung der einzelnen funktionalen Anforderungen in dieser Gegenüberstellung ist in Tabelle 3-4 festgehalten. Als funktional nicht plausibel bewertete Kombinationen sind mit (-) markiert.

Tabelle 3-4: Funktionsausprägungen für die energetische Optimierung

	Szenerie	**Szene fern**	**Szene nah**	**Szene mittel-nah**	**Situation**
Routenplanung	FA 1.1		-	-	-
Routenanpassung	FA 1.2		-	-	-
Fahrstreifenplanung	-	-	-	-	FA 1.4
Optimierung Fahrprofil (kontinuierlich)	FA 1.3 FA 1.5.3	-	-	FA 1.5.2	FA 1.5.1
Optimierung Fahrprofil (diskont.)	FA 1.6.3	-	FA 1.7	FA 1.6.1	FA 1.6.1
Optimierung Betrieb Nebenfunktionen	FA 1.8	-	FA 1.8	FA 1.8	FA 1.8
Optimierung Betrieb Kennungswandler	FA 1.9	-	FA 1.9	FA1.9	FA 1.9
Optimierung Energiemanagement	FA 1.10 / FA 1.11			FA 1.11	FA 1.11

FA 1.1: Planung einer energieoptimierten Route (vor Fahrtbeginn)

Auf Grundlage von Karteninformationen zu Szenerie und Szene (fern) soll eine energieoptimierte Route bestimmt werden (inklusive Wahl eines Startzeitpunktes, sofern dieser variabel ist).

FA 1.2: Anpassung der energieoptimierten Route aufgrund von Verkehrsänderungen

Auf Grundlage von Karteninformationen zu Szenerie und Szene (fern) soll eine energieoptimierte Route aufgrund von Verkehrsänderungen angepasst werden können.

FA 1.3: Bestimmung einer energieoptimierten Reisegeschwindigkeit für einzelne Routensegmente

Auf Grundlage von Karteninformationen zu Szenerie und Szene (fern) soll eine energieoptimierte Reisegeschwindigkeit für einzelne Routensegmente bestimmt werden.

FA 1.4: Bestimmung eines energieoptimalen Zielfahrstreifens (Fahrstreifenplanung)

Auf Grundlage von Situationswissen soll ein Zielfahrastreifen bestimmt werden (sofern mehrere verfügbar sind), der im Vergleich mit den Nachbarfahrstreifen die energieoptimale Fahrweise zulässt.

FA 1.5.1: Bestimmung eines energieoptimierten Geschwindigkeitsprofils mitsamt Betriebsweise bzw. Betriebsstrategie unter Beachtung mehrerer Fahrstreifen.

Auf Grundlage von Situationswissen soll ein kontinuierliches energieoptimiertes Geschwindigkeitsprofils mitsamt Betriebsweise (Getriebe) bzw. Betriebsstrategie (Leistungsaufteilung im Antriebsstrang) bestimmt werden. Die Optimierung soll dabei mehrere Fahrstreifen betrachten (sofern verfügbar) und bewerten, ob ein Fahrstreifenwechsel energetisch vorteilhaft ist.

FA 1.5.2: Bestimmung eines energieoptimierten Geschwindigkeitsprofils mitsamt Betriebsweise bzw. Betriebsstrategie für den aktuellen Fahrstreifen

Entspricht FA 1.5.1; Optimierung jedoch auf Grundlage von Informationen zu vorausliegenden Szenen und nur für den aktuellen Fahrstreifen.

FA 1.5.3: Entspricht FA 1.5.2

Optimierung jedoch auf Grundlage von Informationen zu vorausliegenden Szenerie (Topographie, Straßengeometrie, Verkehrszeichen).

FA 1.6.1: Bestimmung energieoptimierter Fahrstrategien mitsamt Betriebsweisen bzw. Betriebsarten für vorausliegende Fahrsituationen, die eine Anpassung der Geschwindigkeit erfordern (unter Beachtung mehrerer Fahrstreifen).

Auf Grundlage von Situationswissen sollen energieoptimierte Fahrstrategien (Verzögern, Beschleunigung, Konstant-/Folgefahrt) mitsamt Betriebsweisen (Getriebe) bzw. Betriebsarten (Segeln, Schubbetrieb) für vorausliegende Fahrsituationen bestimmt werden, die eine Anpassung der Geschwindigkeit erfordern (stationäre Elemente, wie LZA, Verkehrszeichen, Kurven, etc.). Die Optimierung soll auch mehrere Manöver berücksichtigen (z.B für grüne Welle) können.

FA 1.6.2: Entspricht FA 1.6.1

Optimierung jedoch auf Grundlage von Informationen zu vorausliegenden Szenen und nur für den aktuellen Fahrstreifen.

FA 1.6.3: Entspricht FA 1.5.2

Optimierung jedoch auf Grundlage von Informationen zu vorausliegenden Szenerie (Topographie, Straßengeometrie, Verkehrszeichen).

FA 1.7: Bestimmung einer energieoptimierten Annäherungsfahrstrategie an vorausfahrende Fahrzeuge

Auf Grundlage von Informationen zu vorausliegenden Szene (vorausfahrende Fahrzeuge) soll eine energieoptimierte Annäherungsstrategie bestimmt werden.

FA 1.8: Bestimmung einer energieoptimierten Betriebsstrategie für thermischen Nebenfunktionen

Auf Grundlage von Situationswissen, Informationen zu vorausliegenden Szenen und Szenerie sowie Betriebspunkten des Antriebsstranges sollen Betriebsstrategien zur vorausschauenden Steuerung des Thermomanagements bestimmt werden.

FA 1.9: Bestimmung einer Getriebeschaltstrategie zur energetischen Arbeitspunktoptimierung bei Annäherung an vorausfahrende Fahrzeuge und stationäre Elemente sowie bei Stop&Go-Situationen

Auf Grundlage von Situationswissen, Informationen zu vorausliegenden Szenen und Szenerie soll eine Getriebeschaltstrategie bestimmt werden, die zu energetisch günstigen Arbeitspunkten des Motors führt.

FA 1.10: Planung einer energieoptimierten State-of-Charge-Strategie

Auf Grundlage von kartenbasierten Informationen zu Szenerie und Szene (fern) sowie zusätzlichen Reiseinformationen (z. B. Entfernung zum Fahrziel) soll eine SoC-Leitrajektorie bestimmt werden.

FA 1.11: Bestimmung einer energieoptimalen Hybridbetriebsstrategie

Auf Grundlage von Situationswissen, Informationen zu vorausliegenden Szenen und Szenerie sollen energieoptimale Betriebsvorgaben für hybride Antriebsstränge bestimmt werden.

Skalierbarkeit des Funktionsumfanges

Die Anforderungen 1 bis 11 sind funktional voneinander unabhängig formuliert. Das bedeutet, dass mit der Erfüllung jeder der funktionalen Anforderung ein Ergebnis generiert werden soll, für sich genommen ausführ- bzw. darstellbar ist und einen direkten Kundennutzen erzeugen kann. Die realisierende Funktionalarchitektur muss daher im Stande sein, die funktionalen Anforderungen einzeln zu realisieren.

Neben der Umsetzung einzelner Anforderungen muss die Funktionalarchitektur jedoch auch die parallele Umsetzung mehrerer Anforderungen unterstützen. Die Parallelumsetzung bietet das Potential den Fahrzeugbetrieb umfänglicher energetisch optimieren zu

können, verglichen zur Einzelumsetzung. In diesem Zusammenhang können die einzelnen funktionalen Anforderungen als Anforderungsbausteine verstanden werden, die anwendungsfallspezifisch in einer konkreten Systemausprägung zusammengebracht werden.

Hinsichtlich der Kombination gelten jedoch folgende Einschränkungen:

- Eine **parallele kontinuierliche Fahrprofil- und diskontinuierliche Fahrstrategieoptimierung** auf Basis des gleichen Vorausschauhorizonts mit den gleichen Vorausschauinformationen erzeugt keinen funktionalen Mehrwert. Das begründet sich darin, dass die kontinuierliche Fahrprofiloptimierung durch ihre globale Optimierung für den betrachteten Horizont bereits einzelne, manöverbezogene Fahrstrategien umfasst. Greifen die realisierenden Optimierungsfunktionen jedoch auf unterschiedliche Vorausschauinformationen zu (z. B. topographiebasierte Fahrprofiloptimierung (mittlerer Horizont) und objektbezogene Annäherungsoptimierung (Fahrstrategieoptimierung im nahen Horizont), können die Optimierungsergebnisse kombiniert werden.
- Eine **direkte Umsetzung der in der Fahrprofiloptimierung bestimmten Betriebsstrategie** durch den Antriebsstrang ist bei einem empfehlenden Assistenzansatz nicht möglich. Diese Einschränkung liegt darin begründet, dass bei einem empfehlenden Assistenzsystem stets der Fahrer die durch Antriebsstrang zu realisierende Sollleistung mittels Fahrpedal vorgibt. Dabei steht es dem Fahrer frei, sich nicht an das empfohlene, optimale Fahrprofil zu halten, worauf die Betriebsstrategie entsprechend reagieren muss. Dies bedeutet für die Funktionalarchitektur, dass bei einem empfehlenden Assistenzansatz der Fahrprofiloptimierung eine separate, nachgelagerte Betriebsstrategieoptimierung folgen muss. Bei einem automatisierten Assistenzansatz hingegen, bei dem der Fahrer als Regler wegfällt, kann die Betriebsstrategieoptimierung integriert mit der Fahrprofiloptimierung erfolgen.

Zusammengefasst lautet die funktionale Anforderung an die Funktionalarchitektur wie folgt:

FA 2 Skalierbarkeit des Funktionsumfanges: Die Funktionalarchitektur muss sowohl die Realsierung einzelner funktionaler Anordnungen als auch die kombinierte Umsetzung mehrerer Anforderungen unterstützen.

Weitere funktionale Anforderungen

Neben den funktionalen Anforderungen hinsichtlich Optimierungsfunktionen muss die die Architektur den folgenden zusammengefassten funktionalen Anforderungen genügen:

FA 3 Vorausschau: Die Funktionalarchitektur muss modular hinsichtlich der Bereitstellung von Vorausschauinformationen sein. Die Vorausschau soll Ausgangsdaten aus On-Board-Sensorik, digitalen Karten und Verkehrstelematik nutzen und Informationen zu vorausliegenden Szenerien und Szenen bereitstellen.

FA 4 Prädiktion und Situationsbewertung: Die Funktionalarchitektur muss Funktionen zur Prädiktion des Fahrerverhaltens sowie des Verhaltens von Umfeldobjekten vorsehen, da dies Störgrößen im Sinne der Optimierung darstellen. Zusätzlich müssen Funktionen vorgesehen werden, die auf Grundlage der Vorausschauinformationen definierte Situationen erkennen und sie in der Prädiktion berücksichtigen.

FA 5 Assistenzkonzept: Die Funktionalarchitektur muss die Umsetzung sowohl eines empfehlenden als auch eines automatisiert ausführenden Assistenzkonzeptes unterstützen. In einem konkret ausgeprägten Assistenzsystem sollen beide Assistenzkonzepte zur Verfügung stehen, sodass sowohl die manuelle als auch die automatisierte Fahrzeugführung energetisch optimiert werden können.

3.4 Nichtfunktionale Anforderungen

Über die Erfüllung von nichtfunktionalen Anforderungen kann die Qualität einer Architektur bewertet werden, weshalb die nichtfunktionalen Anforderungen auch als Qualitätsattribute bezeichnet werden[132]. Für den Bereich der Softwarearchitekturen für informationsverarbeitete Systeme sind sich dabei verschiedene Kategorien von Qualitätsattributen bekannt, deren Bedeutung sich jedoch auch auf funktionale Betrachtung von Systemarchitekturen übertragen lässt. Im Folgenden werden diese als allgemeine nichtfunktionale Anforderungen bezeichneten Qualitätsattribute kurz erläutert und im Anschluss werden die für die Entwicklungsszenarien (vgl. Kapitel 3.1.2) relevanten Schwerpunkte dieser Attribute abgeleitet.

3.4.1 Allgemeine nichtfunktionale Anforderungen

In der Literatur zu Softwarearchitekturen sind folgende Kategorien von allgemeinen nichtfunktionalen Anforderungen vorzufinden[133]:

- **Funktionalität**: Vorhandensein von Funktionen, die den funktionalen Anforderungen genügen, wobei angemessene und richtige Ergebnisse ausgegeben wer-

[132] Vogel et al. (2009): Software-Architektur, S. 108

[133] Entnommen aus Lotz (2016): Eine Referenzarchitektur für die a/a-Fahrzeugführung, S.36-37

den. Dabei werden anwendungsspezifische Normen und gesetzliche Bestimmungen eingehalten. Die Interoperabilität, d.h. die Einbettung in die Betriebsinfrastruktur, ist sichergestellt.

- **Sicherheit (security)**: Das Softwareprodukt ist sicher, d.h. vor unberechtigtem, versehentlichen und vorsätzlichem Zugriff geschützt
- **Zuverlässigkeit**: Die Software kann das notwendige Leistungsniveau halten, besitzt eine geringe Versagenshäufigkeit und eine hohe Verfügbarkeit. Die Software ist robust gegenüber Fehlern oder der Nicht-Einhaltung ihrer spezifizierten Schnittstellen. Falsche Eingaben („garbage-in“) sollten nicht zu falschen Ausgaben („garbage-out“) führen
- **Benutzbarkeit**: Die Bedienung der Software ist für den Nutzer verständlich und einfach zu erlernen (Software-Ergonomie).
- **Effizienz**: Beschreibt das Verhältnis zwischen dem Leistungsniveau der Software und dem Umfang der eingesetzten Betriebsmittel.
- **Änderbarkeit**: Beschreibt den Aufwand, der zur Implementierung von Änderungen notwendig ist, wobei Änderungen Fehlerkorrekturen, Verbesserungen sowie das Hinzufügen neuer funktionaler Anforderungen mit einschließen.
- **Übertragbarkeit**: Beschreibt die Eignung der Software, in eine andere Hard- und Software-Umgebung übertragen zu werden.
- **Testbarkeit**: Die Testbarkeit ist der Aufwand, in der Software enthaltene Fehler auffinden zu können und möglichst schnell eine hohe Testabdeckung zu erreichen.

3.4.2 Nichtfunktionale Anforderungen an eine funktionale Referenzarchitektur für Systeme zur energetischen Optimierung des Fahrbetriebs

Die Kernanforderungen an die zu entwickelnde funktionale Referenzarchitektur stellt ihre kombinierte Anwendbarkeit sowohl bei initialen Entwicklung als bei Änderungsentwicklungen (vgl. Entwicklungsszenarien) dar. Hinsichtlich der oben genannten nichtfunktionalen Anforderungen bilden daher Funktionalität und Änderbarkeit die Schwerpunkte im Bereich der nichtfunktionalen Anforderungen. Da gemäß den Entwicklungsszenarien neben der Entwicklung auch das Testen Berücksichtigung finden muss, stellt die Testbarkeit ein weiteres explizit zu adressierendes Qualitätsattribut dar.

Funktionalität

Mit einer expliziten Aufstellung der nichtfunktionalen Anforderung nach Vorhandensein von Funktionen, die den funktionalen Anforderungen genügen, soll sichergestellt wer-

den, dass eine zu entwickelnde Architektur ihren beabsichtigten Anwendernutzen auch gewährleitet. Wird diese Anforderung nicht sichergestellt, so ist es denkbar, dass eine Architektur zwar gut änderbar, übertragbar oder testbar ist, jedoch ihr fachliches Ziel nicht erreicht und die vom Nutzer gewünschten Funktionalitäten enthält.

Im Architekturentwurfsprozess lässt sich das Ziel der Funktionalität dadurch erreichen, dass sämtliche funktionale Anforderungen explizit durch Elemente der Architektur (d.h. Komponenten und Schnittstellen) aufgenommen und umgesetzt werden. Finden sich am Ende des Entwurfsprozesses funktionale Anforderungen, die nicht durch mindestens ein Element der Systemarchitektur berücksichtigt wurden, so ist Funktionalität unter Umständen eingeschränkt und die Architektur dahingehend als unvollständig zu bewerten.

Änderbarkeit

Im Kontext von Software bzw. Softwarequalität bedeuten Änderungen Korrekturen, Verbesserungen oder Anpassungen an Änderungen der Umgebung, der Anforderungen oder der funktionalen Spezifikationen[134]. Konkreter formuliert, können Änderungen die Erweiterung/Verbesserung von Funktionen, Löschung unerwünschter Systemfunktionen, Adaption an neue Umgebungs- / Betriebsbedingungen sowie die Umstrukturierung der Architektur bedeuten.

Hinsichtlich der Entwicklungsszenarien aus Kap. 3.2.1 entsprechen das Erweitern und Löschen von Funktionalitäten dem Szenario „Änderung eines bestehenden Systems“, in dem Funktionsumfänge eines bereits vorhandenen Optimierungssystems geändert werden. Dies stellt beispielsweise die Erweiterung einer energieeffizienten Annäherungsfunktion an vorausfahrende Fahrzeuge um Funktionen zum energieeffizienten Passieren von Lichtzeichenanlagen dar. Die Adaption an neue Umgebungs-/Betriebsbedingungen entspricht hingegen dem Entwicklungsszenario der Übertragung und Anpassung eines bestehenden Optimierungssystems auf ein anderes Fahrzeug bzw. auf einen anderen Antriebsstrang. Generell gilt bei sämtlichen Änderungen, dass eine Architektur möglichst robust gegenüber diese sein sollte, sodass der Änderungsaufwand minimal ist (vgl. Modifikation Kap. 1.2.3).

Zur Begünstigung der Änderbarkeit von Systemen sind architekturseitig unterschiedliche Ansätze denkbar. Flexibilität bei minimalem Änderungsaufwand kann dadurch erreicht werden, dass sämtliche potentielle Änderungen an einem System antizipiert werden und als funktionale Vorhalte in der Architekturgestaltung berücksichtig werden. Dieser Ansatz ist als Prinzip des Entwurfs für Veränderung (englisch: *Design for Change*) bekannt[135]. Derartig hochflexible Architekturen haben allerding Nachteile gegen-

[134]Starke (2014): Effektive Softwarearchitekturen, S.40

[135] Vogel et al. (2009): Software-Architektur, S. 135

über einfacheren Architekturen z. B. hinsichtlich des Ressourcenverbrauchs. Daher sollte bei unwahrscheinlichen Änderungen die Einplanung sorgfältig abgewogen werden.

Änderbarkeit kann jedoch auch bei Architekturentwürfen erhöht werden, die Funktionalitäten nicht explizit a-priori vorsehen. Für diesen Fall werden gezielte Entwurfstaktiken für Architekturen vorgeschlagen, die die Änderbarkeit erhöhen[136]:

- **Reduktion der Modulgröße:** Der Aufwand, kleinere Module zu ändern, ist gegenüber großen Modulen geringer.
- **Erhöhen der (semantischen) Kohäsion:** Verantwortlichkeiten, die verschiedenen Zwecken dienen, sollten nicht mit einem Modul abgebildet werden. Besser ist es hierfür ein neues Modul schaffen oder die Verantwortlichkeiten in einem anderen Modul zuschreiben.
- **Reduktion der Kopplung zwischen Modulen:**
    - *Encapsulate*: Verwendung von Kapselungen und expliziten und abstrakten Schnittstellen zwischen Modulen reduziert die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine Veränderung von einem Modul zum anderen verbreitet.
    - *Use an intermediary*: Die Nutzung von „Mittlern“ reduziert Abhängigkeiten zwischen Modulen.
    - *Restrict dependencies*: Module dürfen nur mit anderen, freigegebenen Modulen wechselwirken, z. B. in geschichteten Architekturen oder durch die Verwendung von gekapselten Modulen (andere Module sehen nicht die interne Funktion).
    - *Refactor*: Gemeinsame Respnsibilites, die in mehreren Modulen identisch vorhanden sind, werden zusammengefasst in ein Modul.
    - *Abstract common services*: Sehr ähnliche Services, die durch verschiedene Module bereitgestellt werden, können durch eine abstraktere Form durch ein gemeinsames Modul ersetzt werden.

Testbarkeit

Testbarkeit beschreibt, zu welchem Grad ein zu testendes (Software-)Artefakt einen Test in einem gegebenen Testkontext unterstützt. Mit sinkender Testbarkeit steigt der dazu zu bertreibende Testaufwand. Generell wächst der Testaufwand mit der Komplexität von Systemen, weshalb die Forderung nach Testbarkeit insbesondere bei komplexen Systemen eine hohe Bedeutung hat. Insbesondere Fahrerassistenzsysteme mit

[136] Bass et al. (2013): Software Architecture in Practice, S. 121 ff

Umfeldwahrnehmung stellen aufgrund ihrer internen Systemkomplexität und der Vielzahl möglicher Umfeld-beschreibender Parameter derartige Systeme dar[137].

Um Testbarkeit im Architekturentwurf zu adressieren, werden von Bass et al. zwei Entwurfstaktiken vorgeschlagen[138]. Eine Entwurfstaktik zieht darauf, die Kontrollier- und Beobachtbarkeit im System zu erhöhen. Hierzu ist es erforderlich, nicht nur die Eingangs- und Ausgangsschnittstellen der Module zu beobachten, sondern auch ihre inneren Zustände. Um die inneren Zustände auch gezielt kontrollieren zu können, wird die Nutzung dedizierter, nicht funktionsgetriebener Schnittstellen vorgeschlagen. Ebenfalls wird die Nutzung von sog. Sandboxen empfohlen, in denen Module isoliert laufen und wo sämtliche äußeren Einflusse kontrolliert werden können, auch benachbarte Systeme/Module. Dieser Ansatz entspricht der Nutzung von Testumgebungen. Wie Lotz[139] anmerkt, beziehen sich diese Anforderungen jedoch nicht direkt auf die funktionale Architektur und die Partitionierung von Systemfunktionen auf Softwaremodule.

Die zweite von Bass et al. vorgestellte Entwurfstaktik zielt darauf ab, die Komplexität im Systemdesign zu reduzieren. Die Reduktion der strukturellen Komplexität lässt sich dabei grundsätzlich dadurch reduzieren, das zyklische Abhängigkeiten vermieden, Abhängigkeiten zur Umwelt isoliert bzw. gekapselt und generell die Abhängigkeiten zwischen Komponenten reduziert werden[140]. Dies wird durch die Beachtung der folgenden Architekturprinzipien begünstigt[141]:

- *Prinzip der hohen Kohäsion*: Die Kohäsion beschreibt, wie stark die Elemente innerhalb eines Moduls inhaltlich voneinander abhängen. Eine hohe Kohäsion liegt dann vor, wenn ein Modul „alle die zum Verstehen und Ändern relevanter Eigenschaften in seiner Beschreibung vereint“[142]. Dies ermöglicht einzelne Systembausteine als Black Boxes zu betrachten, die unabhängig voneinander geändert und ausgetauscht werden können.
- *Prinzip der losen Kopplung*: In einer Architektur werden die Beziehungen zwischen den Modulen als Kopplung bezeichnet. Nach dem Prinzip der losen Kopplung sollen die Beziehungen so gering wie möglich gehalten werden, was sich in einer möglichst geringen (logischen) Abhängigkeit der Module untereinander äußert. Dies erhöht die Verständlichkeit eines Systems, da die Anzahl an zusätzlichen Modulen, die zum Verständnis des betrachteten Elementes notwendig

[137] Lotz (2016): Eine Referenzarchitektur für die a/a-Fahrzeugführung, S.37

[138] Bass et al. (2013): Software Architecture in Practice, S. 164 ff

[139] Lotz (2016): Eine Referenzarchitektur für die a/a-Fahrzeugführung, S.41

[140] Bass et al. (2013): Software Architecture in Practice, S. 167

[141] Erläuterungen der Prinzipien gemäß Vogel et al. (2009): Software-Architektur, S. 125 ff

[142] Vogel et al. (2009): Software-Architektur, S. 134

sind, minimiert wird. Gleichzeitig wird die Änderbarkeit erhöht, da Änderungen lokal an einzelnen Modulen durchgeführt werden können ohne weitere Module betrachten zu müssen. Eine lose Kopplung führt architektonisch in der Regel zu einer hohen Kohäsion.

- *Separation-of-Concerns-Prinzip*: Das Separation of Concerns Prinzip sagt aus die verschiedenen Aspekte eines Problems voneinander zu trennen, um so in der Lage zu sein jedes Teilprobleme für sich behandeln zu können. Das Prinzip reduziert die Komplexität und ermöglicht ein arbeitsteiliges Vorgehen.
- *Information-Hiding-Prinzip*: Das Information-Hiding-Prinzip besagt, dass einem Modul nur die wirklich benötigen Informationen zugänglich gemacht werden, die es für die Erfüllung der Aufgabe benötigt. Information Hiding kann beispielsweise mittels Schichtenarchitekturen realisiert werden, wenn eine Schicht nur auf die jeweils über- oder untergeordnete Schicht zugreifen kann.

Die Verwendung von geschichteten Architekturen als Mittel zur Reduktion struktureller Komplexität bietet den Vorteil, dass einzelne Schichten unabhängig voneinander zunächst entwickelt und dann getestet werden können[143]. Als weitere Taktik zur Komplexitätsreduktion schlagen Bass et al. vorgeschlagen die Verhaltenskomplexität der Module zu beschränken um nichtdeterministisches Verhalten zu vermeiden. Zusammengefasst wird dieser Punkt als Vermeidung von Nichtdeterminiertheit.

3.4.3 Fazit

Für die in dieser Arbeit zu entwickelnde funktionale Referenzarchitektur wurden anhand der Entwicklungsszenarien Funktionalität, Änderbarkeit und Testbarkeit als primären nichtfunktionalen Anforderungen abgeleitet. Zur Erreichung einer hohen Änderbar- und Testbarkeit wurden dabei aus dem Softwaredesign stammende Entwurfstaktiken vorgestellt, die hinsichtlich ihrer Inhalte auch für den Entwurf einer funktionalen Architektur gültig sind. Der Vergleich der Entwurfstaktiken aus beiden Bereichen zeigt, da sie im Kern darauf abzielen die Modularität eines Systems zu stärken. Eine hohe Modularität liegt vor, wenn die Architektur aus wohldefinierten Bausteinen besteht, deren funktionale Verantwortlichkeiten klar abgegrenzt sind[144]. In diesem Sinne ergänzen sich die Entwurfstaktiken für Änderbarkeit und Testbarkeit.

Die identifizierten nichtfunktionalen Hauptanforderungen Änderbarkeit und Testbarkeit stellen auch im Architekturentwurf für assistiertes bzw. automatisiertes Fahren nach Lotz[145] die herausragenden nichtfunktionalen Anforderungen dar. Lotz leitet aus diesen

[143] Bass et al. (2013): Software Architecture in Practice, S. 168

[144] Vogel et al. (2009): Software-Architektur, S. 145

[145] Lotz (2016): Eine Referenzarchitektur für die a/a-Fahrzeugführung, S.45

Anforderungen eine Checkliste zur Prüfung der nichtfunktionalen Anforderungen, die die eine qualitative Bewertung und Vergleich von Architekturvarianten ermöglichen soll (Tabelle 3-5).

Tabelle 3-5: Checkliste zur Prüfung der nichtfunktionalen Anforderungen, in verkürzter Form entnommen aus[145]

Nr.	Kriterium	Beschreibung
1	Prüfung auf zyklische Abhängigkeiten	Analyse der Informations- und Kontrollflüsse, die zur Umsetzung der funktionalen Anforderungen entstehen. Prüfung, ob dabei möglichst wenige zyklische Abhängigkeiten auftreten.
2	Prüfung auf Determinismus	Prüfung, ob bei vorgegeben Modul-Eingangsgrößen das Ergebnis bzw. das resultierende Systemverhalten mit hoher Konfidenz vorhergesagt werden kann.
3	Prüfung auf Möglichkeit der Dekomposition	Prüfung, ob zwischen der Entscheidung und Ausführung von Systemfunktionen unterschieden wird und diese hinreichend unabhängig voneinander sind.
4	Prüfung auf hohe Kohäsion	Prüfung, ob ein Modul alle notwendigen Teilfunktionen, Eigenschaften und Kompetenzen besitzt, um eine spezifizierte Gesamtfunktion umsetzen zu können.
5	Prüfung auf lose Kopplung	Prüfung, ob eine Modulveränderung leicht möglich ist, ohne dass ein komplexes Verständnis anderer Module vorausgesetzt wird.
6	Prüfung auf Einhaltung des Information-Hiding-Prinzips	Prüfung, ob die Architektur mehrere (Abstraktions-) Schichten besitzt, wobei eine Schicht nur auf die jeweils über- oder untergeordnete Schicht zugreifen kann.
7	Prüfung auf Separation-of-Concerns	Prüfung, ob funktionale Anforderungen gemäß erforderlicher Teilfunktionen gruppiert und in ein einzelnes Modul abgebildet werden können.
8	Prüfung der Modulgröße	Prüfung, ob sich die Zuständigkeiten eines Moduls nicht weiter in mehrere Module aufspalten lassen.
9	Prüfung auf mögliche Refaktorierung	Prüfung, ob Zuständigkeiten nicht redundant vorliegen oder widersprüchlich sind.
10	Prüfung auf semantische Kohäsion	Prüfung, ob sich die Funktionalität eines Moduls semantisch einfach und eindeutig beschreiben lässt.

Durch die vergleichbaren zugrundeliegenden nichtfunktionalen Anforderungen und die allgemeingültige Formulierung der Kriterien der Checkliste finden Aspekte daraus im Folgenden Verwendung.

4 Entwicklung der funktionalen Referenzarchitektur

Für die Entwicklung einer funktionalen Referenzarchitektur, die den in Kapitel 3 formulierten funktionalen und nichtfunktionalen Anforderungen genügt, wird ein Top-Down-basiertes Vorgehen vorgeschlagen. Gemäß dem Prinzip „vom Groben ins Feine“ wird zunächst eine funktionale Grobarchitektur entworfen, die die benötigten Funktionen des Systems grob ordnet und dabei die nichtfunktionalen Anforderungen nach Änderbarkeit und Testbarkeit adressiert. Den Hauptaspekt in diesem Schritt stellen dabei der Vergleich mehrerer Grobarchitekturvarianten und die Erläuterung von jeweiligen Vor- und Nachteilen dar. Grundlage für den Entwurf der funktionalen Grobarchitektur bilden Architekturschemata aus dem Bereich der Kotrollarchitekturen für mobile Roboter. Im Gegensatz zum Bereich der Fahrerassistenzsysteme, in dem die benutzen Architekturansätze meist nur von der Darstellung spezifischer Funktionalitäten getrieben werden, stellen in der Robotik Überlegungen zur allgemeinen architektonischen Strukturen und Referenzarchitekturen rege geführte Diskussionspunkte dar[146]. Die Überlegungen aus der Robotik lassen sich auf das Problemfeld der Assistenzsysteme zur energetischen Optimierung des Fahrbetriebs anwenden, da in beiden Domänen das Ziel verfolgt wird, die zur Verfügung stehenden Systemfreiheitsgrade von lang- bis kurzfristig zu planen und in konkretes Systemverhalten umzusetzen. Dabei gilt es ein Ziel sicher, komfortabel und mit minimalem Kosteneinsatz (Zeit und Energie) zu erreichen.

Die Grobarchitektur bildet den Rahmen, in welchem der Feinentwurf der funktionalen Referenzarchitektur erfolgt. Dies beinhaltet die Verteilung von Funktionalitäten in die Elemente der Grobarchitektur, die Partitionierung in Module sowie daraus abgleitet die Definition von Schnittstellen.

Dem Entwurf der Gesamtsystemarchitektur vorangestellt, wird jedoch zunächst der Bereich der Optimierung hinsichtlich seiner Bestandteile betrachtet. Die dem Optimierungsbereich zugeordneten Planungsfunktionen stellen die Kernelemente dar um die geforderten funktionalen Anforderungen zur energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebs darstellen zu können.

[146] Lotz (2013): System Architectures for Automates Vehicle Guidance Concepts, S. 48

4.1 Optimierungsbereich

Die Kernbestandteile in der zu entwickelnden Systemarchitektur bilden die Optimierungsfunktionen. Sie stellen die funktionalen Elemente dar, die energieoptimales Verhalten auf den Ebenen der Navigation, Fahrweise und Betriebsweise auf Grundlage von unterschiedlichen Vorausschauinformationen planen.

4.1.1 Strukturierung der Optimierungsfunktionen

Die zur Erfüllung der funktionalen Anforderungen erforderlichen Optimierungsfunktionen lassen sich nach dem Vorausschauhorizont und der zu optimierenden Aufgabe im Fahrbetrieb strukturieren. Hinsichtlich der zu optimierenden Aufgaben wird unterschieden zwischen der *Routenplanung* (Navigation), der *Manöverplanung* (Fahrweise), der *Trajektorienplanung für die Fahrweise* sowie der *Trajektorienplanung für die Betriebsweise*. Während die Aufgabe der Manöverplanung die Planung und Auswahl geeigneter Fahrmanöver (z. B. Fahrstreifen folgen, Fahrstreifen wechseln) umfasst, beinhaltet der Bereich der Trajektorienplanung (Fahrweise) die Optimierungsfunktionen zur konkreten Ausgestaltung der ausgewählten Manöver. Die Ausgestaltung beinhaltet dabei die Bestimmung der energieoptimalen Fahrprofile (Geschwindigkeitstrajektorien). Die Optimierungsfunktionen im Bereich der Trajektorienplanung für die Betriebsweise bestimmen energieoptimale Sollwert- und Leittrajektorien für die Energie- und Kennungswandler des zugrundeliegenden Antriebsstranges. Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2 zeigen die Verortung der Optimierungsfunktionen in diesem Strukturierungsrahmen. Sie stellen zwei grundsätzliche Varianten des Optimierungsbereiches dar. In der einen Variante wird die Aufgabe der Trajektorienplanung für die Fahrweise und Betriebsweise durch die gemeinsame Optimierungsfunktion „Integrierte Planung der Fahrweise und Betriebsmodi“ dargestellt (Abbildung 4-1). In der anderen Variante werden die Trajektorienplanung für Fahrweise und Betriebsweise durch zwei separierte Optimierungsfunktionen adressiert (Abbildung 4-2).

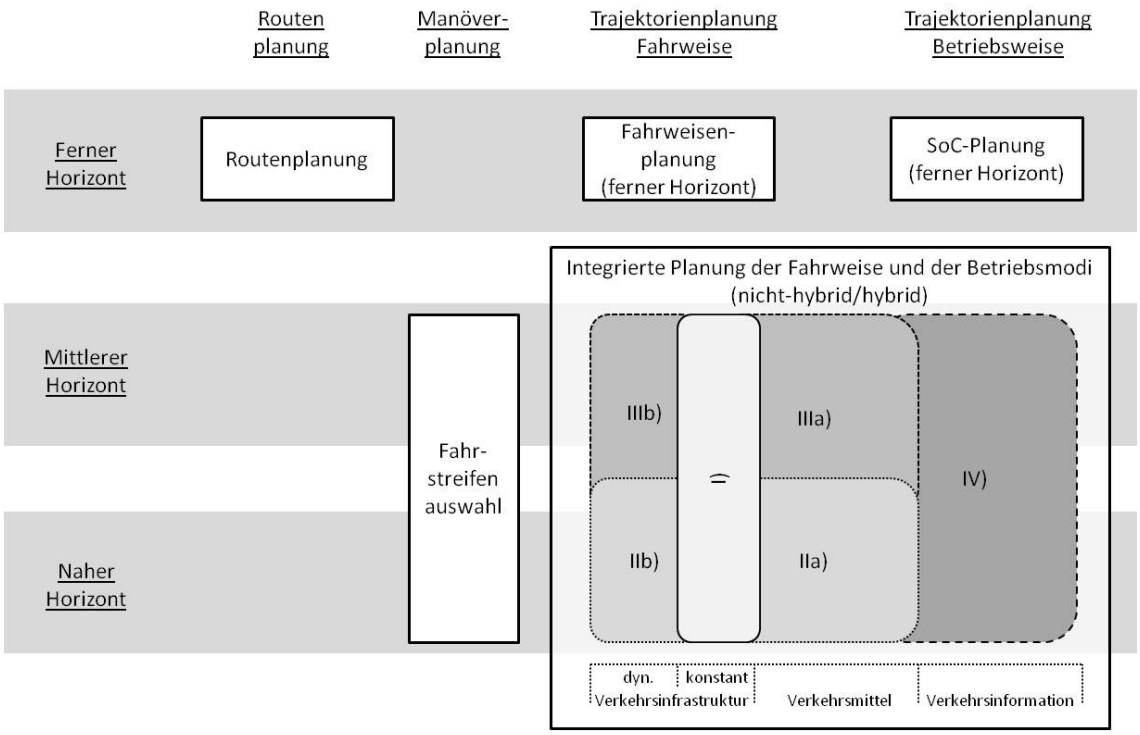

Abbildung 4-1: Strukturierungsrahmen für Optimierungsfunktionen mit integrierter Planung für Fahrweise und Betriebsmodi

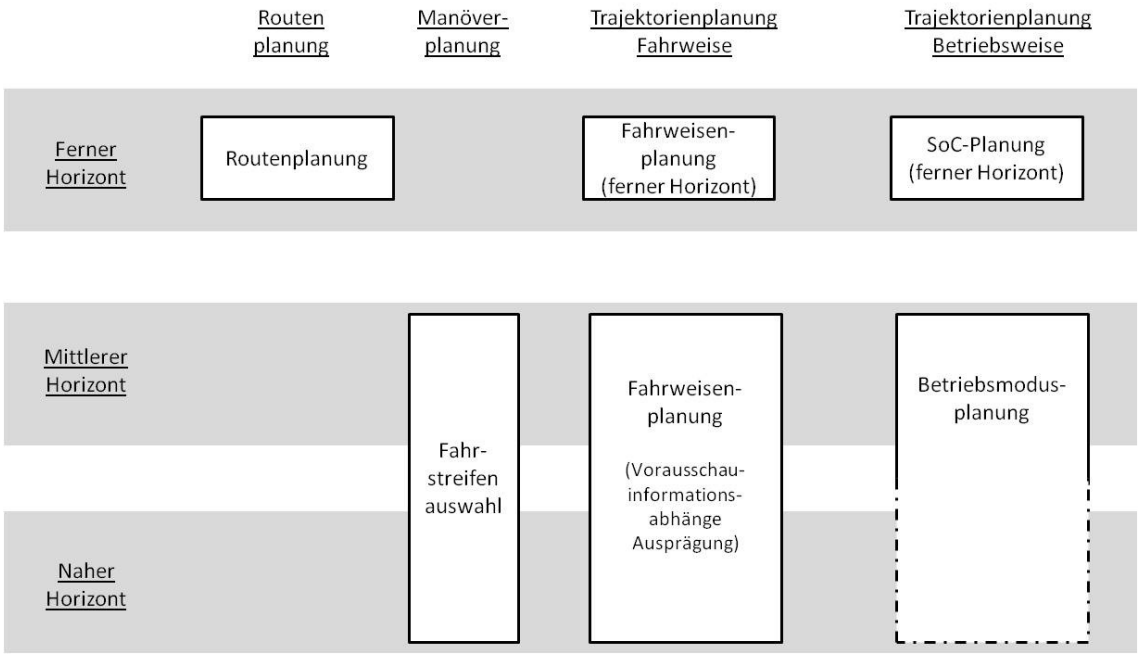

Abbildung 4-2: Strukturierungsrahmen für Optimierungsfunktionen mit separierter Planung für Fahrweise und Betriebsmodi

Aus architektonischer Sicht ermöglicht die Trennung in zwei Optimierungsfunktionen eine Modularisierung der beiden Trajektorienplanungen. Dies begünstigt Flexibilität, da beide Optimierungsfunktionen unabhängig voneinander entworfen und bertrieben wer-

den können sowie die Austauschbarkeit von Optimierungsfunktionen. Werden beide Optimierungsfunktionen eingesetzt, laufen Sie in einer sequenziellen Anordnung aus erst der Fahrprofilplanung und dann der Betriebsmodusplanung. Hinsichtlich der Optimierungsfreiheitsgrade bedeutet das, dass erst der äußere Freiheitsgrad (d.h. Geschwindigkeitsverlauf) und dann abhängig davon die inneren Freiheitsgrade des Antriebsstranges (z. B. Leistungsverteilung) optimiert werden. Aus funktionaler Sicht ist jedoch eine integrierte Trajektorienplanung für Fahr- und Betriebsweise vorteilhaft, weil in einem Optimierungsmodul innere und äußere Freiheitsgrade voneinander abhängig geplant werden können. Konkret bedeutet dies, dass das Fahrprofil mit dem energieeffizienten Betrieb des Antriebsstranges abgestimmt wird. So kann sich beispielsweise ein Geschwindigkeitsprofil für eine Verzögerung aus der Planung der Betriebsmodi (d.h. Segeln, Rekuperieren, Schubbetrieb) ergeben. Im Entwurf der Referenzarchitektur werden beide Varianten sowohl mit integrierter als auch separierter Optimierung berücksichtigt.

Im folgenden Kapitel werden die Optimierungsfunktionen, die zur Realisierung der geforderten Optimierungsfunktionalitäten benötigt werden, erläutert.

4.1.2 Optimierungsfunktionen

Die Optimierungsfunktionen berechnen auf Grundlage der ihnen als Eingangsgrößen bereitgestellten Informationen Ausgangsgrößen, die ein energieminimales Sollverhalten darstellen. Damit das Sollverhalten im Fahrbetrieb umgesetzt werden kann, müssen die Ausgangsgrößen in von Assistenzkonzept abhängige Outputs an den Fahrer, die Automatisierung oder eine Kombination von beiden bereitgestellt werden. Eine tabellarische Beschreibung der der pro Optimierungsfunktion benötigten Vorausschauinformationen, Ausgangsgrößen und der assistenzkonzeptabhängigen Outputs kann Anhang A entnommen werden.

Routenplanung

Die Optimierungsfunktion Routenplanung plant und aktualisiert energieminimale Routen auf Grundlage der Repräsentation des Straßennetzwerkes und ergänzender Verkehrs- und Infrastrukturdaten unter Beachtung der vorliegenden Antriebsstrangtopologie. Die Ausgangsgröße stellen Routenpläne dar (inkl. optimalem Startzeitpunkt der geplanten Fahrt), die über ein Navigationssystem an den Fahrer zur Auswahl und nach der Auswahl zur Routenführung bereitgestellt werden. Eine alternative Ausgabe an eine Automatisierung ist im Kontext eines vollautomatisierten Fahrzeuges denkbar. Mit dieser Optimierungsfunktion werden die funktionalen Anforderungen **FA 1.1** und **FA 1.2** adressiert.

Fahrweisenplanung (ferner Horizont)

Auf der Basis von straßengenauen Vorausschauinformationen entlang der Route bis zum Ziel wird in der Fahrweisenplanung für den fernen Horizont wird eine Geschwindigkeitstrajektorie bestimmt. Diese Geschwindigkeitstrajektorie enthält energieminimale Zielgeschwindigkeiten für einzelne Abschnitte entlang Route. Dieses Optimierungsmodul ergänzt somit den Routenplan mit Richtwerten für eine energieoptimierte Fahrweise. Ausgeben werden kann diese Richtgeschwindigkeit als Geschwindigkeitsempfehlung für den Fahrer oder als Setzgeschwindigkeit für eine Geschwindigkeitsregelanlage. Mit diesem Optimierungsmodul wird die geforderte Funktionalität nach *Bestimmung einer energieoptimierten Reisegeschwindigkeit für einzelne Routensegmente* realisiert (**FA 1.3**).

Integrierte Planung der Fahrweise und der Betriebsmodi (nicht-hybrider Antriebstrang)

Die Optimierungsfunktion zur integrierten Planung der Fahrweise und der Betriebsmodi bestimmt für nicht-hybride Antriebsstränge eine Kombination aus einer energieminimaler Geschwindigkeitstrajektorie und den dazugehörenden Sollwerttrajektorien für die Antriebsmaschine und ein Getriebe. Die Sollwerttrajektorien entsprechen dabei den Vorgaben, die vom Antrieb umzusetzen sind, damit die geforderte Geschwindigkeitstrajektorie dargestellt wird. Das Optimierungsmodul adressiert somit sowohl die äußeren als auch die inneren Freiheitsgrade.

Im Falle der Umsetzung durch eine Automatisierung werden konkrete Sollwertvorgaben für die Antriebsmaschine (Sollmotormoment) und für Getriebe/Kupplung (Sollgetriebestufe/Sollkupplungszustand) benötigt. Zusätzlich kann auch die Sollgeschwindigkeit der Automatisierung zur Verfügung gestellt werden, um die Regelungsgüte mittels einer überlagerten Geschwindigkeitsregelung zu verbessern[147]. Bei einer Umsetzung durch den Fahrer erfolgt der Output in Form von Sollgeschwindigkeits- oder Sollbeschleunigungsempfehlungen bzw. Bedienempfehlungen für das Fahrpedal („Fuß vom Pedal nehmen“) in Kombination mit Bedienempfehlungen für Getriebe und Kupplung. Der Fahrer tritt dann als Regler auf, der die Fahrweisenempfehlung mittels Fahrpedal in eine indizierte Motorleistungsanforderung umsetzt.

Als Vorausschauinformation benötigt die Optimierungsfunktion zur integrierten Planung der Fahrweise und der Betriebsmodi fahrstreifengenaue Vorausschauinformationen aus der Umfeldsensorik und dem elektronischen Horizont. Je nachdem, welche Vorausschauinformation mit welcher Vorausschauweite (nah/mittel) zur Verfügung steht, ge-

[147] Radke (2013): Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugendurch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien, S. 92-95

staltet sich die Ausprägung der Optimierungsfunktion. Zwischen folgenden Klassen an Vorausschauinformationen wird unterschieden (vgl. Abbildung 4-1):

- **I) Konstante Verkehrsinfrastruktur**: Die Planung erfolgt auf Grundlage von Topographieinformationen sowie aus Informationen zu Grenzgeschwindigkeiten (abgeleitet aus der Straßengeometrie sowie der Verkehrszeichen). Diese Informationen werden durch eine digitale Karte bereitgestellt.
- **II) Zusätzlich Verkehrsmittel (a) und dynamische Verkehrsinfrastruktur (b) im nahen Horizont**: Die Planung erfolgt auf Wissen zu konstanter und dynamischer Verkehrsinfrastruktur sowie zu Verkehrsmitteln. Die Informationen zu dynamischen Verkehrsmitteln stehen nur für den nahen Horizont zur Verfügung, da sie durch die Umfeldsensorik des Fahrzeuges bereitgestellt werden.
- **III) Zusätzlich Verkehrsmittel (a) und dynamische Verkehrsinfrastruktur (b) im mittleren Horizont**: Entspricht Fall II), jedoch stehen die Informationen bis zum Ende des mittleren Horizontes zur Verfügung. Sie werden durch Telematikdienste bereitgestellt.
- **IV) Zusätzlich Verkehrsinformationen**: In die Planung fließen zusätzliche Verkehrsinformationen ein, die in Form von Grenz- oder Durchschnittsgeschwindigkeiten zur Verfügung stehen. Bereitgestellt werden sie durch Telematikdienste.

Stehen beispielsweise einer Optimierungsfunktionsausprägung lediglich Topographieinformationen und Grenzgeschwindigkeiten aus der konstanten Verkehrsinfrastruktur bis zum mittleren Horizont zur Verfügung (kartenbasiert), können keine Verkehrsmittel (z. B. Vorausfahrer) oder dynamische Verkehrsinfrastruktur in der integrieren Planung der Fahrweise und der Betriebsmodi berücksichtigt werden. Folglich kann keine Bestimmung einer energieminimalen Annäherungsstrategie an langsame Vorausfahrer oder an LZA erfolgen. Um auch diese Anforderung zu adressieren, kann entweder die vorliegende Ausprägung der Optimierungsfunktion mit Vorausschauinformationen und Funktionalitäten erweitert werden oder es können parallel zusätzliche Instanzen der Optimierungsfunktion betrieben werden, die dann die entsprechenden Vorausschauinformationen nutzen.

Werden die unterschiedlichen Vorausschauklassen bzw. deren Kombinationen als Grundlage genommen, lassen sich für die integrierte Planung die in Tabelle 4-1 beschriebenen Varianten ableiten.

Tabelle 4-1: Varianten des Optimierungsmoduls Integrierte Planung der Fahrweise und der Betriebsmodi

	Voraus-schauklasse	Vorausschauinformation	Anwendung
V1	I	konstante Verkehrsinfrastruktur über Sensorsichtbereich hinaus	Vorausschauendes Fahren mit Berücksichtigung konstanter Verkehrszeichen/Kurven/etc. („ecoTempomat“)
V2a	I + IIa	Verkehrsmittel im Sensorsichtbereich	Vorausschauendes Fahren mit Annäherung an langsamere Fahrzeuge + Folgefahrt („ecoACC“)
V2b	I + IIb	Statische und dynamische Verkehrsinfrastruktur im Sensorsichtbereich	Vorausschauendes Fahren mit Annäherung an dyn. Verkehrsinfrastruktur (z. B. sensorbasierter „Ampelassistent“)
V2	I + IIa/b	Verkehrsmittel und dynamische Verkehrsinfrastruktur im Sensorsichtbereich	Vorausschauendes Fahren mit Annäherung an langsamere Fahrzeuge + Folgefahrt („ecoACC“) sowie Verkehrsinfrastruktur
V3a	I + IIIa (enthält IIa)	Verkehrsmittel über Sensorsichtbereich hinaus	Vorausschauendes Fahren mit Annäherung an langsamere und stehende Fahrzeuge + Folgefahrt (C2C-basiertes „ecoACC“)
V3b	I + IIIb (enthält IIb)	dynamische Verkehrsinfrastruktur über Sensorsichtbereich hinaus	Vorausschauendes Fahren mit Annäherung an dyn. Verkehrsinfrastruktur (z. B. C2X-basierter „Ampelassistent“)
V3	I + IIIa/b (enthält IIa/b)	Verkehrsmittel und dynamische Verkehrsinfrastruktur über Sensorsichtbereich hinaus	Vorausschauendes Fahren mit Berücksichtigung sämtlicher Verkehrsinfrastruktur und Verkehrsmittel
V4	I + IV	Verkehrsinformation über Sensorsichtbereich hinaus	Energieeffiziente Stau- oder Baustellenannäherung
V5	I + IIIa/b + IV	Sämtliche Vorausinformationen über Sensorsichtbereich hinaus	Vorausschauendes Fahren mit Berücksichtigung sämtlicher Verkehrsinfrastruktur, Verkehrsmittel und Verkehrsinformationen

In konkreten Systemausprägungen können die Varianten jeweils einzeln oder in Kombination betrieben werden. Dabei sollten in einem guten Systementwurf die Kombinationen keine funktionale Redundanz erzeugen, um ein System übersichtlich zu halten.

Je nach Ausprägung des Optimierungsmoduls werden die funktionalen Anforderungen **FA 1.5.x**, **FA 1.6.x** und **FA 1.7** adressiert.

Integrierte Planung der Fahrweise und der Betriebsmodi (hybrider Antriebstrang)

Im Unterschied zur integrierten Planung der Fahrweise und der Betriebsmodi für nichthybride Antriebstränge, bestimmt die Optimierungsfunktion bei hybriden Antrieben neben einer Geschwindigkeitstrajektorie die Sollwerttrajektorien für alle Energie- und Kennungswandler des Antriebsstranges (anstatt nur für eine Antriebsmaschine). Damit bedient die Optimierungsfunktion den zusätzlichen internen Freiheitsgrad der Leistungsaufteilung. Mit diesem zusätzlichen Freiheitsgrad entfällt im Unterschied zu nichthybriden Antriebssträngen eine direkte Kopplung zwischen darzustellender Geschwindigkeitstrajektorie und der Sollleistung einer Antriebsmaschine. Beim hybriden Antriebsstrang stehen durch die variable Leistungsaufteilung zwischen mehreren Energiewandlern fast unbegrenzt viele Betriebspunkte zur Verfügung um die Geschwindigkeitstrajektorie darstellen zu können.

Hinsichtlich des Assistenzansatzes lässt sich daraus argumentieren, dass eine alleinige Ausgabe an Fahrer als nicht darstellbar angesehen wird. Würde als Optimierungsergebniss lediglich der Fahrer eine Fahrweisenempfehlung bekommen (Sollgeschwindigkeits- oder Sollbeschleunigungsempfehlungen bzw. Bedienempfehlungen für das Fahrpedal), dann wäre damit noch nicht die energieoptimale Leistungsverteilung festgelegt. Hierzu müsste der Fahrer neben der Fahrweiseempfehlung zusätzlich die Leistungsverteilung zwischen den Energiewandlern bereitgestellt bekommen und umsetzen. Für den Fahrer würde dies bedeuten, dass er neben dem Fahrpedal (entspricht dem Leistungsbedarf) auch das optimale Leistungsbereitstellungsverhältnis zwischen den Energiewandlern manuell gemäß Empfehlung einstellen müsste. Alternativ könnten an den Fahrer auch die Sollwertvorgaben für einzelnen Energiewandler ausgegeben werden, sodass er anstatt des Fahrpedals und der Leistungsverteilung direkt die Energiewandler bedienen müsste. Beide Ansätze werden hinsichtlich ihrer Durchführbarkeit im Fahrbetrieb als nicht darstellbar angesehen.

Eine direkte Umsetzung der optimalen Sollwertvorgaben für die Energiewandler kann hingegen durch Regelsysteme im Fahrzeug erfolgen. Dies entspricht einem ausführenden Assistenzansatz.

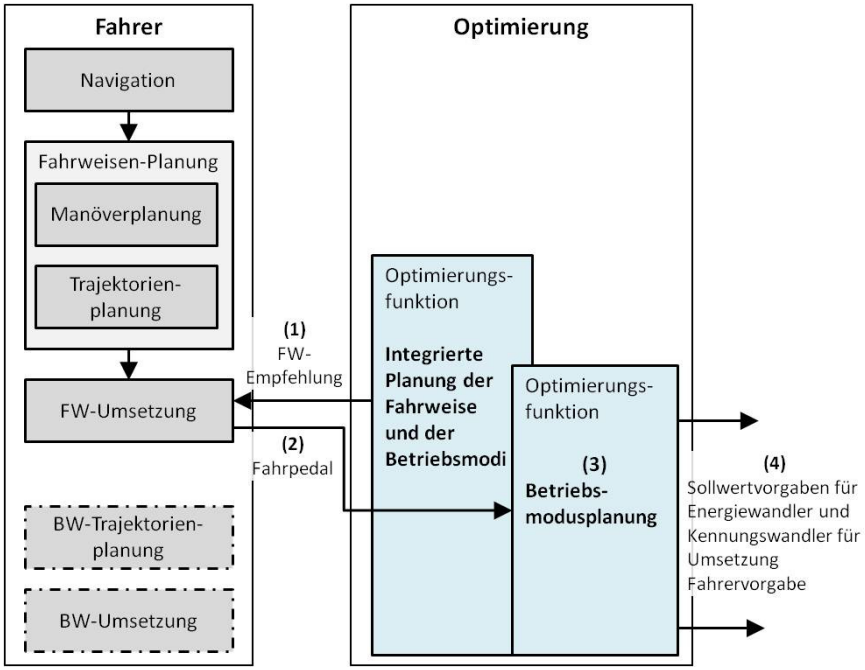

Abbildung 4-3: Notwendige Optimierungsfunktionen für einen kombinierten Assistenzansatz bei hybriden Antriebssträngen

Ist keine ausführende Assistenz gewünscht, ist eine Kombination aus einer Fahrweisenempfehlung an den Fahrer und einer Umsetzung durch die Automatisierung notwendig. Bei dieser Variante wird zunächst das Ergebnis des Optimierungsmoduls an den Fahrer als Sollgeschwindigkeits- oder Sollbeschleunigungsempfehlungen bzw. Bedienempfehlungen für das Fahrpedal ausgegeben (**(1)** in Abbildung 4-3). Im Unterschied zum automatisierten Assistenzansatz dürfen die Sollwerte für die Energiewandler jedoch nicht der empfohlenen (optimalen) Geschwindigkeitstrajektorie entsprechen, sondern müssen sich nach den tatsächlichen Fahrereingaben **(2)** und dessen Geschwindigkeitswunsch richten. Durch den Freiheitsgrad der Leistungsverteilung in einem hybriden Antriebsstrang besteht dennoch die Möglichkeit trotz festgelegter Leistungsvorgabe durch den Fahrer eine energieoptimale Leistungsbereitstellung vorauszuplanen. Dieser Aspekt entspricht einem vorausschauenden Energiemanagement und ist in dem Optimierungsmodul zur vorausschauenden Betriebsmodusplanung beinhaltet. Architektonisch bedeutet dies, dass neben der integrierten Planung der Fahrweise und der Betriebsmodi eine zusätzliche Betriebsmodusplanung **(3)** parallel vorgehalten werden muss. Führt der Fahrer das Fahrzeug selber, werden die Sollwerte für die Energiewandler **(4)** daher durch das Optimierungsmodul Betriebsmodusplanung bereitgestellt und nicht durch das Optimierungsmodul zur integrierten Planung der Fahrweise und der Betriebsmodi.

Auch bei diesem Optimierungsmodul ist die Ausprägung abhängig von den zur Verfügung stehenden Vorausschauinformationen abhängig (vgl. Integrierte Planung der Fahrweise und der Betriebsmodi (nicht-hybrider Antriebstrang)).

Fahrweisenplanung (ohne Betriebsmodus-Planung)

Die Optimierungsfunktion zur Fahrweisenplanung bestimmt auf Grundlage von fahrstreifengenauen Vorausschauinformationen eine energieoptimierte Geschwindigkeitstrajektorie für den betrachteten Vorausschauhorizont (nah bis mittel). Im Gegensatz zur integrierten Planung der Fahrweise und der Betriebsmodi erfolgt hier keine Planung der Betriebsmodi, d.h. es wird lediglich der Nutzenergiebedarfs optimiert. Der Nutzenergiebedarf ergibt sich dabei aus den anliegenden Fahrwiderständen. Der hier betrachtete Freiheitsgrad entspricht damit der Geschwindigkeit (äußerer Freiheitsgrad).

Hinsichtlich des Assistenzansatzes kann die Geschwindigkeitstrajektorie in Form einer Sollgeschwindigkeitsempfehlung an den Fahrer oder als Setzgeschwindigkeit für eine Geschwindigkeitsregelanlage ausgegeben werden. Alternativ ist auch die Ausgabe eines Sollmomentes am Rad denkbar, das durch den Antrieb bereitgestellt werden muss um die Sollgeschwindigkeit zu erreichen.

Diese Optimierungsfunktion stellt von seinem Umfang her eine Untermenge der integrierten Planung dar. Somit zielt es zwar auf die gleichen geforderten Optimierungsfunktionalitäten wie die integrierte Planung der Fahrweise und der Betriebsmodi, kann jedoch durch die nicht betrachtete Betriebsmodus-Planung keine zur Fahrweise passende Betriebsmodi bereitstellen. So bestimmt dieses Optimierungsfunktion beispielsweise keinen Plan, mit welchen Betriebsmodi (z. B. Segeln, Rekuperieren, Schubbetrieb) die Annäherung an eine vorausliegende Fahrsituationen, die eine Reduktion der Geschwindigkeit erfordern, energieminimal dargestellt werden könnte.

Fahrstreifenauswahl

Die Funktion zur Fahrstreifenauswahl bestimmt für die vorausliegende Strecke im nahen und mittleren Horizont, ob und wann ein Fahrstreifenwechsel aus energetischer Hinsicht vorteilhaft ist[148]. Dies kann grundsätzlich auf zwei Arten erfolgen:

- V**orausschaubasierte Fahrstreifenauswahl**: Die Bestimmung, ob eine Fahrstreifenwechsel günstig ist, erfolgt allein auf Grundlage von Vorausschauinformationen. Die Funktion zur Fahrstreifenauswahl bewertet hierfür die vorausliegende Verkehrssituation und schlussfolgert daraus, welcher Fahrstreifen eine energieminimale Fahrweise voraussichtlich an besten begünstigen wird. Anschließend entscheidet sie über einen Vorschlag zum Fahrstreifenwechsel.
- **Optimierungsergebnisbasierte Fahrstreifenauswahl**: Die Bestimmung, ob eine Fahrstreifenwechsel günstig ist, erfolgt allein auf Grundlage von Berechnungsergebnissen der anderen Optimierungsfunktionen. In dieser Variante liegt

[148] Das gilt unter der Bedingung, dass mehrere Fahrstreifen befahrbar sind.

der der Fahrstreifenauswahl bereits die Information vor, welches der energieminimale Fahrstreifen ist, sodass diese nur noch über die Initiierung des Fahrstreifenwechsels entscheiden muss.

In der ersten Variante erfüllt die Fahrstreifenauswahl die **FA 1.4** (*Bestimmung eines energieoptimalen Zielfahrstreifens*), ohne dass weitere Optimierungsfunktionen genutzt werden müssen. In der zweiten Variante ist jedoch das Vorhandensein von fahr-/betriebsweisenplanenden Optimierungsfunktionen erforderlich, weshalb somit gleichzeitig die **FA 1.5.1**, **FA 1.6.1** und **FA 1.7** erfüllt werden können.

Vorausschauendes Energiemanagement: State-of-Charge-Planung und Betriebsmodusplanung (hybrider Antriebsstrang)

Das vorausschauende Energiemanagement, hat die Aufgabe abhängig von einem erwarteten Nutzenergiebedarf eine energieoptimale Leistungsbereitstellung lang- bis mittelfristig vorauszuplanen. Ziel ist dabei stets, die inneren Energieflüsse im Antriebsstrang zum gegenwärtigen Zeitpunkt so festzulegen, dass im betrachteten Vorausschauhorizont die Energieeffizienz maximiert wird. So kann es beispielsweise energetisch günstig sein vor einer Gefällestrecke mit deutlichem Rekuperationspotential den Batterieladegrad vorausschauend zu senken, in dem vor der Gefällestrecke verstärkt elektrisch gefahren wird.

Für das vorausschauende Energiemanagement werden zwei Optimierungsfunktionsvarianten vorgesehen. Die SoC-Planung für den fernen Horizont bestimmt auf Grundlage straßengenauer Vorausschauinformationen entlang der Route bis zum Ziel eine Leittrajektorie für den SoC. Die Werte der Leittrajektorie repräsentieren dabei Richtwerte, die einen Bereich markieren, in dem sich der SoC bewegen soll. Wird beispielsweise entlang der Route eine Stausituation erkannt, kann mittels der Leittrajektorie veranlasst werden, dass der SoC bis zum Erreichen der Stausituation angehoben wird um im Stau möglichst weit elektrisch fahren zu können. Die Betriebsmodusplanung für den mittleren bis nahen Horizont hingegen bestimmt konkrete Sollwerttrajektorien bzw. die Leistungsaufteilung für die Energie- und Kennungswandler basierend auf dem aktuellen Fahrerwunsch. Die beinhaltet auch Trajektorien für die Nebenaggregate der thermischen Nebenfunktionen, sofern deren Freiheitsgrade in der vorausschauenden Betriebsmodusplanung berücksichtigt werden.

Die wesentliche Vorausschauinformation für die Betriebsmodusplanung für den mittleren bis nahen Horizont stellt dabei die Prädiktion des Energieflusses am Rad dar. Ist dem Optimierungsmodul bekannt, welche Energieab- und -zuflüsse zu erwarten sind, kann dies in der Festlegung des aktuellen Betriebsmodus und der Lastpunkte berücksichtigt werden. Für die Optimierung der thermischen Funktionen können zusätzlich

Wetterinformationen berücksichtigt werden, die als Randbedingungen bzw. in einer Prädiktion der thermischen

Die SoC-Planung setzt die **FA 1.10** um und die Betriebsmodusplanung adressiert die **FA 1.10** sowie die **FA 1.8**.

4.1.3 Koordination und Steuerung von Optimierungsfunktionen

Die Optimierungsfunktionen bzw. deren Ausprägungen zur Planung der Fahrweise und Betriebsmodi (integriert bzw. separiert) stellen jeweils spezifische, von der Optimierungsaufgabe abhängige, fahrstreifenbezogene Trajektorien zur Verfügung. Je nach Systemauslegung können dabei mehrere Optimierungsfunktionen in einem System vorhanden sein, die alle auf die Umsetzungsschnittstelle zugreifen möchten. Für eine situationsgerechte Darstellung der Optimierungsergebnisse im Fahrzeug (empfehlend oder ausführend) ist daher eine Koordination und Steuerung der Optimierungsfunktionen erforderlich.

Die notwendigen Koordinations- und Steuerungsaufgaben resultieren aus der Erfüllung der folgenden funktionalen Anforderungen:

- **Bereitstellung der für die vorausliegende Fahrsituation passenden und kostenminimalen Fahrweisen- und Betriebsmodustrajektorien**: Je nach vorausliegender Fahrsituation entlang des Vorausschauhorizontes (z. B. Freifahrt, Annäherung an konstante/dynamische Verkehrsinfrastrukturelemente und Verkehrsmittel, Folgefahrt) muss die Trajektorien bereitgestellt werden, die sowohl ein sicheres und verkehrsregelkonformes als auch kostenminimales Durchfahren der Fahrsituation ermöglicht. Berücksichtigt eine Optimierungsfunktion beispielsweise keine vorausliegenden LZA (vgl. Variante 1 in Tabelle 4-1), dann darf die von ihr berechnete Trajektorie nicht verwendet werden, sofern eine weitere Optimierungsfunktion zur Verfügung steht, die die LZA berücksichtigt und ggf. darauf verzögert (vgl. z. B. Variante 3b in Tabelle 4-1). Kommen für eine vorausliegende Fahrsituation grundsätzlich mehrere Trajektorien in Frage, dann muss die kostenminimale Trajektorie für eine Umsetzung bereitgestellt werden. Ein Sonderfall ergibt sich, wenn ein System lediglich eine einzige Optimierungsfunktion enthält. Hier entfällt zwar die Forderung nach einer situationsgerechten Auswahl, dennoch ist es denkbar zumindest eine situationsangepasste Unterbrechung der Bereitstellung des Optimierungsergebnisses vorzusehen.
- **Bestimmung des kostenminimalen Fahrstreifens**: Die Optimierungsfunktionen bestimmen ihre Trajektorien jeweils fahrstreifenbezogen. Stehen auf einem Streckenabschnitt mindestens zwei befahrbare Fahrsteifen zu Verfügung, wird für jeden diese Fahrstreifen eine entsprechende Trajektorie ermittelt. Durch den

Vergleich der Optimierungsergebnisse kann bestimmt werden, welcher Fahrstreifen hinsichtlich einer energieminimalen Fahr- und Betriebsweise vorzuziehen ist.

- **Triggerung einer Fahrstreifenwechselempfehlung**: Befindet sich das Fahrzeug auf einem nicht energieoptimalen Fahrstreifen, so kann die Empfehlung angetriggert werden auf den energieminimalen Fahrstreifen zu wechseln. Hierzu ist das Wissen notwendig, auf welchem Fahrstreifen sich das Ego-Fahrzeug aktuell befindet.
- **Steuerung der Manöverausführung**: Entlang des virtuellen Fahrstreifens können verkehrsinfrastrukturbedingte Haltepunkte vorhanden sein, die ein Anhalten des Ego-Fahrzeuges erfordern. Es wird zwischen folgenden Haltepunkten unterschieden:
    a. Haltepunkt vor einer LZA: Im Fahrstreifen befindet sich ein vom LZA-Zustand abhängiger potentieller Haltepunkt. Die Weiterfahrt bzw. Auffahrt auf einen vorrangigen Fahrstreifen wird eindeutig durch den LZA-Zustand geregelt.
    b. Haltepunkt vor einem vorrangigen Fahrsteifen (Vorfahrtsituation): Im Fahrstreifen befindet sich ein dauerhaft vorhandener Haltepunkt, an welchem anderen Fahrzeugen Vorfahrt zu gewähren ist. Das Kreuzen bzw. Auffahren auf den vorrangigen Fahrstreifen ist erst bei Kollisionsfreiheit möglich.

Die Berechnung von energieminimalen Verzögerungstrajektorien berücksichtigt diese Haltepunkte, sofern die nötigen Vorausschauinformationen verfügbar sind. Für den Fall a. wird vorausgesetzt, dass neben der Position der LZA auch ihr Zustand bekannt sein muss, da ansonsten keine LZA-zustandsabhängigen Annäherungstrajektorien berechnen werden könnten. Ist der Zustand der Optimierungsfunktion jederzeit bekannt, so kann die Optimierungsfunktion selbstständig festgelegen, wann das Wiederanfahren wieder möglich ist, da dies explizit durch die LZA geregelt ist. Im Unterschied dazu darf im Fall b. das Wiederanfahren erst dann erfolgen, wenn Kollisionsfreiheit zu einem vorfahrtsberichtigten Verkehrsmittel gewährleistet ist. Solange dies nicht der Fall ist, muss die Manöverausführung pausieren und das Ego-Fahrzeugt festgehalten werden. Erst wenn eine Freigabe vorliegt, darf das Ego-Fahrzeug wieder anfahren. Die Prüfung und Freigabe erfolgt hierbei durch den Fahrer. Alternativ ist es auch denkbar die Freigabe durch Entscheidungsfunktionen, wie sie bei vollautomatisierten/autonomen Fahrzeugen benötigt werden, durchführen zu lassen.

Für die Interaktion mit der Entscheidungsinstanz müssen folglich zusätzliche Funktionen vorgesehen werden:

- Einfordern einer Wiederanfahrfreigabe durch die Entscheidungsinstanz
- Management der Wiederanfahrfreigaben, wenn die Freigaben durch die Entscheidungsinstanz bereits vor Erreichen des Haltepunktes erteilt werden.

Hinsichtlich der Berechnung der Trajektorien durch die Optimierungsfunktionen muss berücksichtigt werden, dass bei einer vorzeitigen Freigabe die bereitgestellten Trajektorien nicht dazu führen, dass das Ego-Fahrzeug an der Haltlinie anhält. Stattdessen darf es mit einer gemäßigten Geschwindigkeit den Haltpunkt überfahren. Entsprechend muss dies in der Trajektorienkoordination berücksichtigt werden.

- **Bereitstellung Begründung für Geschwindigkeitsanpassung**: Um die Nachvollziehbarkeit und die Akzeptanz insbesondere durch die ausführende Assistenz dargestellten Fahrweisen zu erhöhen, soll dem Fahrer der Grund für eine Geschwindigkeitsanpassung bereitgestellt werden. Zusätzlich kann der Fahrer mittels dieser Info vorkonditioniert werden, wenn voraus beispielsweise eine Freigabesituation liegt, in der er aktiv werden muss.
- **Handling Assistenzkonzept:** Sieht die Systemauslegung sowohl eine empfehlendes als auch ein ausführende Assistenz vor, müssen die vorhanden Optimierungsfunktionen gegebenenfalls je nach gewähltem Assistenzansatz ausgewählt bzw. koordiniert werden. Dies gilt in erster Linie bei hybriden Antriebsträngen, wenn beim Wechsel zwischen ausführender und empfehlender Assistenz die Optimierungsfunktionen „integrierte Planung der Fahrweise und Betribsmodi“ und „Betriebsmodusplanung“ koordiniert bzw. die Ergebnisse arbitriert werden müssen.

4.2 Architekturschemata

Als Architekturschemata werden in Kontext dieser Arbeit grundlegende Muster verstanden, nach denen die Elemente (Funktionen oder Softwaremodule) angeordnet sein können. Grundsätzlich kann zwischen einer sequenziellen oder nebenläufigen Anordnung der Elemente unterschieden werden[149]. Als Stellvertreter dieser beiden Richtungen werden im Folgenden die SMPA-Architektur (sequentielle Anordnung) und verhaltensbasierten Architekturen (nebenläufige Anordnung) vorgestellt. Ein Architekturschema, das versucht die Vorteile beider Ansätze zu kombinieren, ist die Nutzung von unter-

[149] Hertzberg et al. (2012): Mobile Roboter, S. 320

schiedlichen Ebenen. Diese ebenenbasierten Architekturen werden daher auch als hybride Architekturen bezeichnet[150].

4.2.1 SMPA-Architektur

In einer SMPA-Architektur (Sense-Model-Plan-Act) werden innerhalb eines Kontrollzyklus zunächst Sensordaten aufgenommen (Sense), die Daten analysiert und die relevanten Aspekte in ein partielles Modell der Umgebung überführt (Model). Anschließend wird auf Grundlage dieser Informationen der Bearbeitungsstand der aktuell in Ausführung befindlichen Aktion des aktuellen Plans (Handlungsplans, Pfadplans) geprüft bzw. der nächste Schritt geplant (Plan). Schließlich erfolgt die Ausführung der laufenden oder neu ermittelten Aktion (Act)[151] [152]. Diese Sequenz fasst zwar die Hauptkomponenten einer umgebungsabhängigen Kontrolle eines Roboters auf plausible und übersichtliche Art zusammen, jedoch führt die die starre und sequenziell geordnete Struktur zu dem Problem, dass in jedem Rechenzyklus zunächst die rechenzeitintensiven Teilschritte Model und Plan ausgeführt werden, bevor der Roboter eine Aktion ausführen kann. Diese starre Abfolge verlängert die Reaktionszeit des Roboters, weshalb er nicht in der Lage ist auf unvorhergesehene Gegebenheiten (z. B. entgegenkommende Hindernisse) zu reagieren. Eine sequenzielle Architektur ist daher für dynamische Umgebungen, wie beispielsweise dem Straßenverkehr, nicht geeignet[153].

4.2.2 Verhaltensbasierte Architekturen

Kernelemente in verhaltensbasierten Architekturen bilden sogenannte Verhaltensweisen bzw. -bausteine, die für jeweils bestimmte Aufgaben in der Roboterkontrolle vorgesehen sind. Jeder Verhaltensbaustein kennzeichnet sich dadurch aus, dass er direkt Zugriff auf Sensorik und Aktorik hat und somit das Roboterverhalten unmittelbar beeinflussen kann, ähnlich einem Reflex. Verhaltensbausteine entsprechen den üblichen Teilleistungen von Robotern wie durch die Umgebung streifen (wander), Hindernisvermeidung (avoid objects), Kartierung (build maps), Objekterkennung (identify objects), bis hin zur Handlungsplanung (plan changes to the world)[154].

Die Grundidee einer verhaltensbasierten Architektur ist, diese Verhaltenselemente ständig nebenläufig die Sensordaten analysieren zu lassen, ihren jeweiligen Beitrag zur

[150] Hertzberg et al. (2012): Mobile Roboter, S. 324

[151] Hertzberg et al. (2012): Mobile Roboter, S. 321

[152] Kortenkamp & Simmons (2008): Robotic Systems Architectures and Programming, S. 189

[153] Lotz (2013): System Architectures for Automates Vehicle Guidance Concepts, S. 48

[154] Hertzberg et al. (2012): Mobile Roboter, S. 323

Roboterkontrolle in jedem Zyklus zu sammeln und daraus jeweils die effektiven Kontrollkommandos zu errechnen[155]. Die einzelnen Verhaltensbausteine können dabei durchaus auch unterschiedlichen Zeitskalen zugeordnet sein.

Eine bekannte Ausprägung für eine verhaltensbasierte Architektur stellt die Subsumptions-Architektur von Brooks[156] dar. Diese Architektur erlaubt es, durch das Hinzufügen von Verhaltensbausteinen immer komplexere Roboter(verhalten) zu erhalten. Über den Subsumption-Ansatz wird dabei festgelegt, wie sich in einem Kontrollzyklus die Systemantwort aus den aktuellen Beiträgen sämtlicher Verhaltensbausteine zusammensetzt. Der Subsumption-Ansatz beinhaltet dabei einen Arbitrierungsmechanismus, der es Verhaltensbausteinen auf einer höheren Ebene ermöglicht Signale von Verhaltensbausteinen auf einer niedrigeren Ebene zu übersteuern[157]. Durch diese Hierarchisierung von Verhaltensbausteinen wird es ermöglicht, auch Roboter mit komplexen Wechselwirkungen von Verhaltensbausteinen zu entwerfen. Die Festlegung, unter welchen Voraussetzungen ein Verhaltensbaustein einen anderen subsumiert, ist Teil der Programmierung des Roboterkontrollsystems[158]. Je mehr Verhaltensbausteine jedoch benötigt und hinzugefügt werden, desto größer wird der zu betreibende Aufwand für die Arbitrierung der Verhaltensbausteine. Auch die Darstellung von Planungsverhalten für die Erreichung von langfristigen Zielen gestaltet sich in verhaltensbasierten Architekturen schwierig[157].

Verhaltensbasierte Architekturen bieten im Gegensatz zur SMPA-Architektur jedoch den Vorteil, dass sie es einem Roboter erlauben, schnell auf unvorhergesehene Gegebenheiten zu reagieren. Auch unterstützen sie die Erweiterbarkeit von Funktionalitäten durch das Hinzufügen von zusätzlichen Verhaltensbausteinen[159].

4.2.3 Ebenenbasierte Architekturen

Mittels ebenenbasierter Architekturansätze wird versucht, die Vorteile einer SMPA-Architektur mit denen der verhaltensbasierten Architekturen zu kombinieren. Während ein verhaltensbasierter Anteil in einer Architektur geeignet ist, den erforderlichen reaktiven Part der Roboterkontrolle strukturiert zu realisieren, ist ein SMPA-basierter Anteil geeignet, für einen weiten Zeithorizont zielgerichtete Aktion zu koordinieren. Die Kombinationen beider Ansätze werden daher auch als hybride Architekturen bezeichnet[160].

---

[155] Hertzberg et al. (2012): Mobile Roboter, S. 321

[156] siehe z. B. Brooks (1986): A Robust Layered Control System for a Mobile Robot

[157] Kortenkamp & Simmons (2008): Robotic Systems Architectures and Programming, S. 190

[158] Hertzberg et al. (2012): Mobile Roboter, S. 323

[159] Lotz (2013): System Architectures for Automates Vehicle Guidance Concepts, S. 50

[160] Hertzberg et al. (2012): Mobile Roboter, S. 324

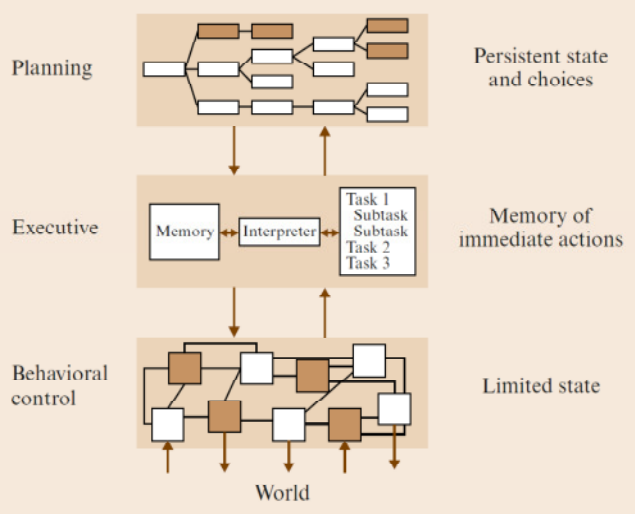

Abbildung 4-4: Beispielhafte Drei-Ebenen-Architektur[161]

Die gebräuchlichste Ausprägung einer ebenenbasierten Architektur ist charakterisiert durch die Verwendung von drei Ebenen[162]. Auf der höchsten Ebene (Planning Layer) erfolgt die langfristige Planung von Handlungen, die zur Zielerreichung erforderlich sind. Dies beinhaltet auch eine Neuplanung für die Fälle, in denen sich eine Situation geändert hat und die ursprüngliche Planung nicht mehr zielführend ist. Das Ergebnis der Handlungsplanung stellt eine Abfolge von Aktionen dar, die durch die mittlere Ebene (Executive Layer) entgegen genommen wird. Die Aufgabe der mittleren Ebene ist es nun die jeweils nächste Aktion aus dem aktuellen Plan auszusuchen, gegebenenfalls passend zu instanziieren und auf die Ebene der Verhaltensbausteine zu zerlegen[163]. Dabei werden auch die zeitlichen Randbedingungen für die Ausführung der Verhaltensbausteine bestimmt, d.h. ob Verhaltensbausteine sequenziell oder gleichzeitig ausgeführt werden. Dies beinhaltet ebenfalls die Arbitrierung der Verhaltensbausteine, wenn diese z. B. zeitgleich Zugriffe auf die Aktorik anfordern[164]. In der Gegenrichtung interpretiert die mittlere Ebene die Rückmeldungen der Aktionsüberwachung und muss entscheiden, ob eine Aktion erfolgreich oder erfolglos abgeschlossen ist, weiterlaufen oder möglicherweise variiert werden muss[165]. In der untersten Ebene (Behavioral Control Layer) sind die Verhaltensbausteine implementiert, die in schnellen Zeitzyklen das physische Roboterverhalten anstoßen und überwachen. Dieser Bereich ist gekennzeichnet durch

[161] Entnommen aus Kortenkamp & Simmons (2008): Robotic Systems Architectures and Programming, S. 191

[162] Kortenkamp & Simmons (2008): Robotic Systems Architectures and Programming, S. 191

[163] Hertzberg et al. (2012): Mobile Roboter, S. 324

[164] Kortenkamp & Simmons (2008): Robotic Systems Architectures and Programming, S. 196

[165] Hertzberg et al. (2012): Mobile Roboter, S. 323

eine direkte Verbindung zwischen Sensorik und Aktorik und adressiert somit den reaktiven Part in der Roboterkontrolle.

Neben dem Ansatz mit drei Ebenen, die sich „allgemein durchgesetzt hätten, ohne dass dies wirklich zwingend für eine funktionale Systemarchitektur sei„[166], gibt es auch Architekturüberlegungen mit mehr Ebenen. Ein wichtiges Beispiel ist hierbei die die *Real-Time Control System Architecture* (RCS)[167], die in verschiedenen Robotern, autonomen Fahrzeugen und in der Raumfahrt Anwendung findet[168]. Den Kern von RCS bildet der Basisknoten, der in jeder Ebene der Architektur enthalten ist und die Elemente Sensorverarbeitung, Weltmodell, Verhaltensgenerierung und Bewertung enthält. Während die Sensorverarbeitung das Weltmodell mit Informationen speist, erstellt und pflegt das Weltmodell eine Wissensdatenbank, die für die Verhaltensplanung die jeweils bestmögliche Schätzung der Welt enthält[169]. Die Verhaltensplanung nutzt dabei das Weltmodell dafür, die von ihr erstellten Pläne, die aus Aufgaben der übergeordneten Architekturebene abgeleitet werden, hinsichtlich ihres erwarteten Ergebnisses bewerten zu lassen. Die erzeugten Pläne werden dann für eine weitere Zerlegung in die untere Ebene weitergegeben, die ihrerseits wiederum aus einem Basisknoten besteht. Die einzelnen Ebenen der Architektur sind dabei hierarchisch geordnet im Sinne einer zeit- und räumlichen Betrachtungsreichweite[170]. Während sich auf obersten Ebene beispielsweise eine Navigationsaufgabe in einem 10 min Zyklus bearbeitet wird, erfolgt auf der untersten Ebene eine Ausgabe in Richtung Aktorik alle 20 ms.

Zusammenfassend kann über ebenenbasierte Architekturen gesagt werden, dass diese durch den Ansatz der Nutzung unterschiedlicher Ebenen eine Kombination aus Reaktionsfähigkeit und vorausschauender Planung ermöglichen. Durch die aufgabenorientiere Trennung und Hierarchisierung der Ebenen, bei der eine Ebene jeweils nur in Wechselwirkung mit den direkt benachbarten Ebenen steht, wird es zudem ermöglicht die einzelnen Ebenen unabhängig voneinander zu entwickeln, zu implementieren und zu testen. So können beispielsweise auf oberster Ebene bereits einzelne Planungsmodule (z. B. Routenbestimmung) entwickelt und getestet werden, ohne dass dafür die darunterliegenden Umsetzungsebenen erforderlich wären.

---

[166] Maurer (2000): Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen, S. 34

[167] Albus (1997): The NIST Real Time Control System (RCS): An Approach to Intelligent Systems Research

[168] Lotz (2013): System Architectures for Automates Vehicle Guidance Concepts, S. 51

[169] Albus (2000): 4-D/RCS Reference Model Architecture for Unmanned Ground Vehicles, S. 3260

[170] Albus (2000): 4-D/RCS Reference Model Architecture for Unmanned Ground Vehicles, S. 3262

4.3 Funktionale Grobarchitektur

Die funktionale Grobarchitektur strukturiert das Gesamtsystem grob in funktionale Cluster vor. Das Ordnungskriterium ist dabei die Ähnlichkeit der Funktionen bzw. deren inhaltliche Zusammengehörigkeit. Die Clusterung greift daher das Prinzip der hohen Kohäsion bzw. Separation-of-Concerns (vgl. Abschnitt 3.4.2) auf. Die Cluster, im folgenden Funktionsbereiche genannt, stellen die Vorstufe zur Ableitung von konkreten Funktionsmodulen dar. Für die Strukturierung der funktionalen Grobarchitektur sind Varianten darstellbar, die grundsätzlich auf den in Abschnitt 4.2 vorgestellten Architekturschemata basieren. Diese Varianten werden im Folgenden diskutiert, bewertet und schließlich wird eine Variante für die funktionale Grobarchitektur ausgewählt.

4.3.1 Funktionsbereiche

Informationsbereitstellung

In diesem Funktionsbereich sind Funktionen verortet, die dazu dienen das Fahrzeugumfeld sowie die Fahr- und Fahrzeugzustände mittels Sensorik wahrzunehmen bzw. mittels Kommunikationssystemen und aus Datenspeichern (z. B. digitalen Karten) bereitzustellen. Die bereitgestellten Umfeldinformationen reichen vom direkten Fahrzeugumfeld (Nachbereich, z.B. gemessene Abständen und Relativgeschwindigkeiten), über die Eigenschaften der vorausliegenden Straßen und des Verkehrs (mittlerer Bereich, z.B. Straßengeometrie) bis hin zur allgemeinen Verkehrslage z.B. entlang der Route (Fernbereich). Die Fahr- und Fahrzeugzustandsinformationen beschreiben hingegen, in welchem Fahrzustand sich das Egofahrzeug befindet (z.B. Fahrgeschwindigkeit) bzw. welchen Zustand die Systeme und Komponenten im Fahrzeug (z.B. SoC der Batterie, eingelegte Getriebestufe) aktuell aufweisen.

Weltrepräsentation

Die Aufgabe des Funktionsbereiches Weltrepräsentation besteht darin, eine konsistente und fusionierte Repräsentation des Fahrzeugumfeldes für die Optimierung bereitzustellen. Die Weltrepräsentation stellt daher eine Abstraktionsschicht zwischen Sensorik bzw. Umfeldwahrnehmung und dem Bereich der Optimierung dar.

Ego-Fahrzeugrepräsentation

Die Hauptfunktionen im Bereich der Ego-Fahrzeugrepräsentation sind die Repräsentation des aktuellen Fahrzeugzustandes mitsamt der Bereitstellung aller benötigen Fahr-

zeugparameter (z. B. Fahrzeugmasse, Widerstandskoeffizienten) sowie die Modellierung der fahrzeug- und antriebsstrangspezifischen Energiewandlungsprozesse.

Ego-Fahrerrepräsentation

Der Bereich der Ego-Fahrerrepräsentation enthält Modelle, die zum einen das Verhalten des Fahrers des Egofahrzeuges und zum andern das durchschnittliche Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer abbilden.

Optimierung

Auf Grundlage der Informationen aus der Umfeldbeschreibung werden im Funktionsbereich Optimierung energieminimale Routen sowie Fahr- und Betriebsstrategien in dem jeweils betrachteten Vorausschauhorizont berechnet. Die aus der Weltrepräsentation bereitgestellten Informationen stellen dabei den zulässigen Zustandsraum, die Randbedingungen sowie die Störgrößen dar, die für die jeweilige Optimierungsaufgabe gelten. Für die Berechnung greifen die Optimierer dabei zusätzlich auf die Fahrzeug- und optional die Fahrerrepräsentation zu.

Aus- und Eingabekoordination und -verwaltung

Der Bereich der Ein- und Ausgabekoordination und -verwaltung bildet die Schnittstelle zwischen dem Optimierungsbereich und der Regelung bzw. der Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS). Die Hauptaufgabe besteht darin aus den Fahr- und Betriebsweisentrajektorien die aktuellen Sollwerte für die Regelung bzw. die Darstellung mittels der MMS abzuleiten sowie bei Wechseln von Optimierungsmodulen die Sollwerte zu überblenden. Auch die durch den Optimierungsbereich getriggerte Pausierung einer Manöverausführung sowie Ausgabe einer Fahrstreifenwechselempfehlung wir in diesem Bereich verwaltet. Die Koordinationsaufgabe umfasst ebenfalls die Abstimmung mit anderen Fahrerassistenzsystemen, die die Fahrzeuglängsführung beeinflussen. Hinsichtlich der Koordination von Eingabegrößen werden in diesem Bereich die vom Fahrer kommenden Parameter für die Optimierungsfunktionen sowie die Fahrerfreigaben verwaltet.

Regelung

Bei ausführenden Assistenzsystemen beinhaltet dieser Funktionsbereich die für die Umsetzung der Optimierungsergebnisse erforderlichen Fahrzeugregler (im Allg. der Längsregler) bzw. umsetzungsnahe Bestandteile von Hybridstrategien. Bei rein informierenden/empfehlenden Assistenzansätzen wird diese Aufgabe durch den Fahrer ausgeführt.

Mensch-Maschine-Schnittstelle

Über die Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) erfolgt bei rein empfehlenden Assistenzansätzen die Ausgabe von Informationen bzw. Optimierungsergebnissen in Richtung des Fahrers. Gleichzeitig muss die MMS auch in der Lage sein Fahrereingaben entgegennehmen zu können z.B. für eine Zieleingabe oder Parametrierung der Optimierung. Daneben wird über die MMS die Information bereitgestellt, ob der Fahrer die Automatisierung aktiviert hat oder selber die Fahrzeugführung inne hat.

Aktorik

Der Funktionsbereich Aktorik repräsentiert die Elemente des Antriebsstranges, die die Vorgaben aus der Regelung (ausführendes Assistenzkonzept) oder vom Fahrer (empfehlendes Assistenzkonzepte) umsetzten.

4.3.2 Varianten für die funktionale Grobarchitektur

Sequenzielle Architektur

In der sequenziellen Architektur werden pro Verarbeitungszyklus zunächst sämtliche Sensorinformationen abgefragt und diese dann genutzt, um die Fahrzeug-, Fahrer- und Umfeldrepräsentation zu aktualisieren. Die Aktualisierung der Umfeldrepräsentation umfasst dabei sämtliche Horizonte von nah bis fern. Auf Grundlage der aktualisierten Beschreibungen erfolgt anschließend die Prädiktion des Umfeldes womit dann die gemäß einer sequenziellen Architektur ein aktuelles Weltmodell bereit steht. Im darauffolgenden Planungsabschnitt erfolgt zunächst die Berechnung bzw. Aktualisierung einer energieoptimalen Route und dann die Erstellung bzw. Aktualisierung eines Plans, der festlegt, welche Optimierungsfunktionen für die gegebenen Umfeldbedingungen entlang der Route sowie für das aktuell aktive Assistenzkonzept die potentiell besten Optimierungsergebnisse liefern. Gemäß der Optimierungsplanung berechnen die Optimierungsfunktionen dann die energieoptimale Fahr- und/oder Betriebsweise und geben diese für die Umsetzung durch den Antriebsstrang an die Regelung oder die MMS und den Fahrer aus. In einen rein sequenziellen Ansatz wird für jede Ausgabe an die die MMS oder die Regelung die komplette Sequenz durchlaufen.

Der Kernaspekt dieses Architekturansatzes ist der zentrale Planungsschritt, der den Fortschritt bei der Ausführung eines Optimierungsplans beurteilt, den Optimierungsplan aktualisiert und die Optimierungsschritte ansteuert. Für die Erstellung des Optimierungsplans muss der Planer dabei beurteilen können, welche Optimierungsfunktion das beste Ergebnis liefert, falls mehrere Optimierungsfunktionen konzeptbedingt verfügbar sind und aufgrund der aktuellen Umfeldbedingungen in Frage kommen. Ist das System

in seinem Optimierungsumfang her jedoch nur eingeschränkt konzipiert, d.h. gibt es beispielswiese nur eine Optimierungsfunktion (z.B. Nahbereichsoptimierung für den aktuell befahrenen Fahrstreifen), dann reduziert sich auch die Planungsaufgabe dementsprechend. Mit der Menge an nutzbaren Optimierungsfunktionen, steigt sowohl die Komplexität des Planers als auch der Weltmodellierung, da diese die Grundlage für die Planung bildet.

Diskussion

Mit steigendem Umfang an Optimierungsfunktionen wächst die Komplexität der Weltmodellierung und der Planungsaufgabe. Mit steigender Komplexität wiederum wächst Rechenzeitbedarf, was sich bei einer sequenziellen Anordnung der Systemfunktionaliäten in einer sinkenden Performance des Assistenzsystems bemerkbar macht. Der sequenzielle Ansatz geht nämlich davon aus, dass sowohl die Optimierung auf dem fernen, kartenbasierten Horizont (schließt die Routenplanung mit ein), als auch die dynamische Nahbereichsoptimierung in jedem einzelnen Zeitzyklus ablaufen. Für Assistenzsysteme, die insbesondere in Nahbereich mit seiner hohen Dynamik die Optimierung schnell anpassen und das Ergebnis umsetzten müssen, ist daher ein rein sequenzieller Ansatz mit einer umfassenden Weltmodellierung und Planung nicht geeignet. Da die funktionale Referenzarchitektur jedoch auch diese dynamische Nahbereichsoptimierung beinhalten muss, scheidet ein rein sequenzieller Architekturansatz daher aus.

Hinsichtlich Erweiterbarkeit weist eine rein sequenzielle Architektur zudem den Nachteil auf, dass für die Integration neuer Funktionalitäten eine vorhandene Sequenz angepasst werden muss. Die entspricht einer nicht-lokalen architektonischen Anpassung und ist daher als Entwicklersicht nicht wünschenswert.

Die sequentielle Architektur wird im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Nebenläufige Architektur

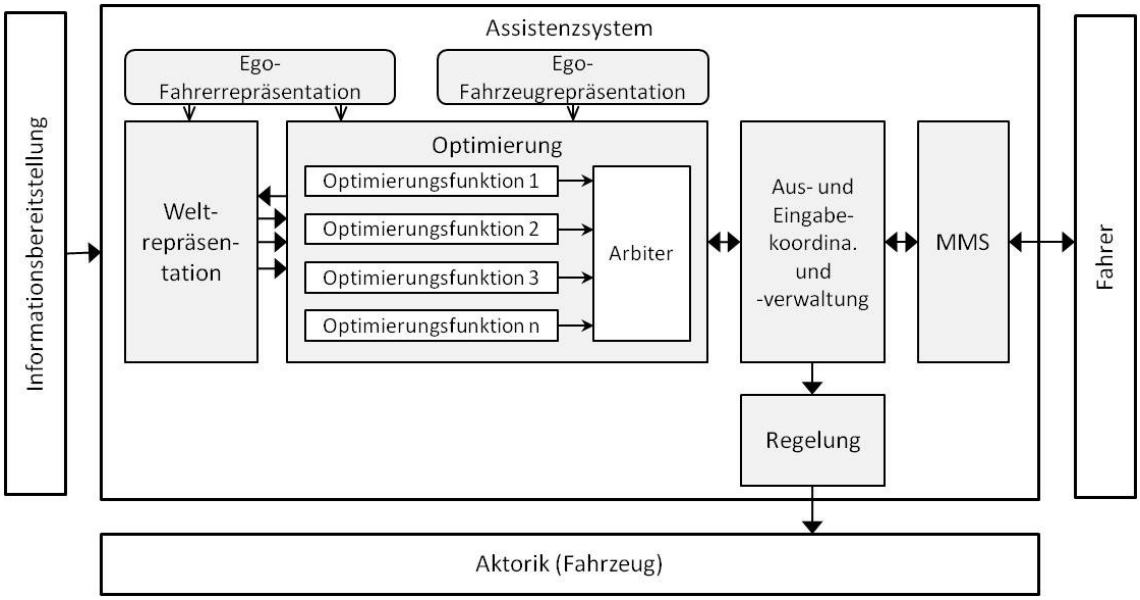

Abbildung 4-5: Funktionale Grobarchitektur - Nebenläufig

In einer nebenläufigen Architektur laufen die verfügbaren Optimierungsfunktionen nebeneinander und bestimmen parallel in den jeweils von ihnen behandelten Vorausschauhorizonten die energieoptimalen Fahr-und/oder Betriebsstrategien sowie die Route. Jede Optimierungsfunktion erhält dabei die für die jeweilige Optimierungsausaufgabe erforderlichen Vorausschauinformationen aus einem spezifischen Bestandteil des Umfeldmodells. Dieses wiederum wird aus dem Bereich der Umfeldwahrnehmung gespeist. Strukturell können die einzelnen Optimierungsfunktionen als Verhaltenselemente verstanden werden, die unmittelbar auf den Umsetzungsbereich (Automatisierung und/oder Fahrer) einwirken können (vgl. Verhaltensbasierte Architektur Kap. 4.2.2). Da jedoch ein gleichzeitiges Einwirken mehrerer Fahr-/Betriebsstrategieoptimierer in Richtung Umsetzung nicht zielführend ist, bedarf es eines Arbitrierungsmechanismus, der den Zugriff auf die Umsetzungsebene koordiniert und steuert. Während in einer an den Subsumption-Ansatz angelehnten Architektur die Arbitrierung durch eine Hierarchisierung dargestellt wird, bei der Verhaltensbausteine auf einer höheren Ebene Signale von Verhaltensbausteinen auf einer niedrigeren Ebene übersteuern können, kann die Arbitrierung auch durch dedizierte Koordinationselemente realisiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird die zweitgenannte Variante betrachtet, weil bei der Nutzung eines Koordinationselementes die gesamte Arbitrierungs- bzw. Koordinationslogik explizit in einem Element verortet werden kann und nicht implizit über eine Hierarchisierung dargestellt werden muss. Dies kommt dem Separation-of-

Concerns-Prinzip[171] entgegen und erleichtert damit die Änderbarkeit eines Systems, weil beim Hinzufügen bzw. Entfernen von Optimierungsfunktionen der Arbitrierungsmechanismus lediglich zentral angepasst werden muss.

Im Gegensatz zur sequenziellen Architektur erlaubt es der nebenläufige Architekturansatz die einzelnen Elemente in unterschiedlichen Zeitskalen ablaufen zu lassen. So darf die Routenberechnung eine deutlich längere Zyklusdauer aufweisen als beispielsweise eine dynamische Fahrweisenoptimierung im Nachbereich, die unmittelbar auf Änderungen im Umfeld reagieren muss.

Diskussion

Die Möglichkeit, die verschiedenen Optimierungsfunktionen in unterschiedlichen Zeitskalen zu verorten, ermöglicht es der nebenläufigen Architektur die komplette Bandbreite an Optimierungsfunktionen abzubilden, ohne dadurch die Performance eines Gesamtsystems zu beeinträchtigen. Zusätzlich wird es durch den nebenläufigen Aufbau in Kombination mit einem Koordinationsmodul ermöglicht, neue Optimierungsfunktionen hinzufügen ohne eine bestehende Architektur anpassen zu müssen. Die zusätzlichen Elemente werden in den bestehenden Funktionsbereichen parallel hinzugefügt und mit dem zentralen Koordinationsmodul verbunden. Im Koordinationsmodul selbst muss dementsprechend die Arbitrierungslogik erweitert werden, was jedoch eine lokale, nicht-architektonische Änderung darstellt. Vor diesem Hintergrund eignet sich die nebenläufige Architektur daher erst einmal grundsätzlich, um sämtliche Funktionalitäten darstellen und eine einfache Änderbarkeit/Erweiterbarkeit anbieten zu können.

Die Kernrolle in diesem Architekturansatz spielt das Koordinationsmodul, da es über einen fahrsituationsgerechten Zugriff der unterschiedlichen Optimierungsfunktionen auf die Umsetzungsebene entscheiden und die entsprechenden Signale weiterleiten muss. Erlaubt eine vorausliegende Fahrsituation den Zugriff mehrerer Optimierungsfunktionen, muss das kostenminimale Optimierungsergebnis für eine Umsetzung durchgestellt werden. Dies beinhaltet ebenfalls die Auswahl des kostenminimalen Fahrstreifens, sofern mehrere befahrbare Fahrsteifen zur Verfügung stehen. Durch die im Informationsfluss den Optimierungsfunktionen nachgelagerte Position stehen dem Koordinationsmodul hierzu entsprechende Optimierungskennwerte als Entscheidungsgrundlage zur Verfügung. Für die Zykluszeit der Arbitrierung bedeutet dies, dass diese sich an der Optimierungsfunktion mit der kürzesten Zykluszeit orientieren muss, um sämtliche Änderungen der Optimierungskennwerte berücksichtigen zu können.

Schwieriger als die eigentliche Arbitrierung gestaltet sich jedoch die Bestimmung, welche Optimierungsergebnisse grundsätzlich für eine vorausliegende Fahrsituation als

[171] Das Prinzip besagt, dass verschiedene Aspekte eines Problems (hier Arbitrierungsaspekt) voneinander getrennt werden, so dass jedes Teilproblem eigenständig behandelt werden kann.

umsetzbar eingestuft werden können. Um diese Bestimmung durchführen zu können, muss das Koordinationsmodul über entsprechendes Umfeldwissen verfügen. Kennt es die vorausliegende Fahrsituation, ist es in der Lage unpassende Optimierungsergebnisse bereits vor der Auswahl des kostenminimalen Optimierungsergebnisses auszusortieren. Architektonisch muss das Koordinationsmodul daher an die Umfeldrepräsentation angebunden sein und um eine entsprechende Planungsfunktion ergänzt werden.

Zusätzlich zur reinen Arbitrierung von Optimierungsergebnissen und der damit verbundenen Triggerung einer Fahrstreifenwechselempfehlung muss der Koordinationsbereich auch die Steuerung der Manöverausführung umsetzten. Ebenso muss in der Arbitrierung das gewählte Assistenzkonzept berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 4.1.3).

Ebenenbasierte Architektur

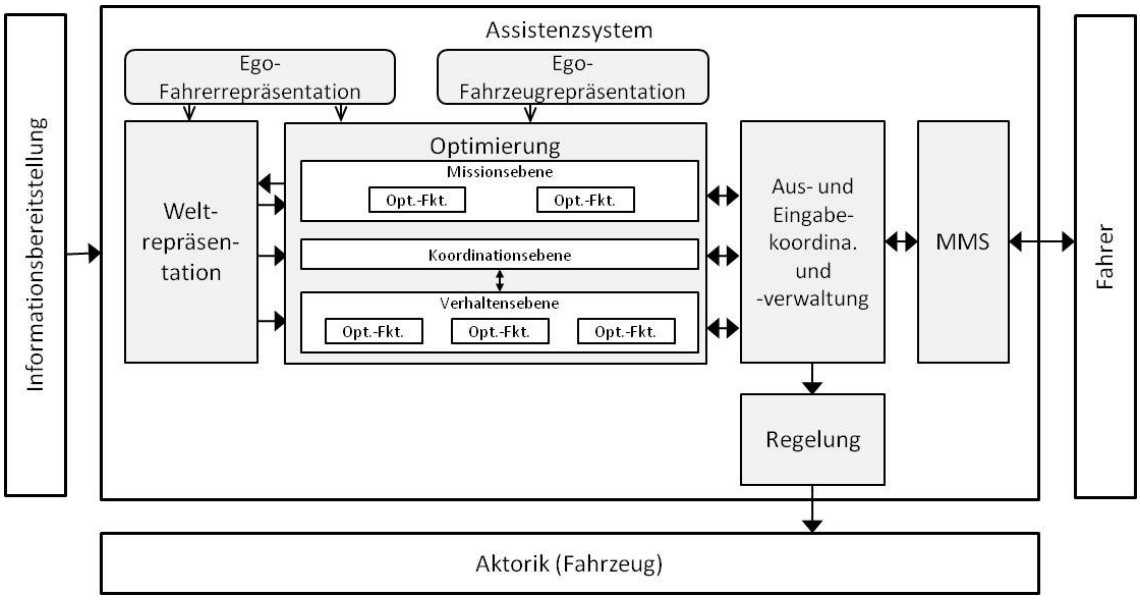

Abbildung 4-6: Funktionale Grobarchitektur - Ebenenbasiert

Der grundlegende Ansatz der ebenenbasierten Architektur besteht darin die Optimierungsfunktionen für den nahen bis mittleren Horizont in einer unteren Ebene zu verorten (Verhaltensebene) und deren Nutzung durch eine übergeorderte Ebene (Koordinationsebene) planen und steuern zu lassen. Die Aufgabe der Koordinationsebene besteht dabei darin, abhängig von den vorausliegenden Fahrsituationen die passenden Optimierungsfunktionen auszuwählen und deren Ausführung zu überwachen. Durch die übergeordnete Position enthält die Koordinationsebene zusätzlich die Funktionen zur Bestimmung des kostenminimalen Fahrstreifens (inklusive Triggerung einer Fahrstreifenwechselempfehlung), zur Steuerung der Manöverausführung und zum Handling des Assistenzkonzeptes (vgl. Abschnitt 4.1.3). Zur Durchführung dieser Koordinationstätigkeiten wird für die Koordinationsebene eine eigene, von der Darstellung und vom Abstraktionsgrad her passende Umfeldrepräsentation vorgehalten.

In der Verhaltensebene befinden die Optimierungsfunktionen, die, wenn sie aktiviert werden, die Fahrweisen- und Betriebsmodustrajektorien bereitstellen. Grundsätzlich soll die Architektur jedoch auch erlauben, dass parallel auch mehrere Optimierungsfunktionen laufen können.

Die Optimierungsfunktionen zur Routenplanung sowie zur fernen Fahrweisen- und SoC-Planung werden in einer weiteren, der Koordinationsebene überlagerten Ebene verortet. Die Aufgabe dieser Ebene besteht darin, für die gesamte Fahrmission die Route zu planen sowie optional Randbedingungen für die Fahrweiseplanung und die Hybridbetriebsstrategie (SoC-Planung) vorzugeben. Diese Ebene wird daher Missionsebene genannt.

Der vorgestellte Ansatz orientiert sich an einer Drei-Ebenen-Architektur (vgl. Abschnitt 4.2.3).

Diskussion

Ähnlich der nebenläufigen Architektur erlaubt es die ebenenbasierte Architektur die verschiedenen Optimierungsfunktionen in unterschiedlichen Zeitskalen ablaufen zu lassen. Während die Optimierungsfunktionen in der Verhaltensebene kurze Zykluszeiten benötigen, um kurzfristig auf Änderungen im Umfeld reagieren können, reicht für die Optimierungsfunktionen in der Missionsebene deutlich längere Zykluszeit. Für die Koordinationsebene gilt, dass diese zwar kein Sollverhalten bestimmt, jedoch bei Änderungen der Fahrsituation rechtzeitig ggf. andere Optimierungsfunktionen ansteuern muss. Qualitativ reicht hierfür jedoch eine längere Zykluszeit, verglichen mit Funktionen in der Verhaltensebene, aus, da die Änderungsrate von Fahrsituationen geringer ist verglichen mit der Änderungsrate dynamische Attribute von Verkehrsmitteln (z.B. Position bzw. Abstand).

Die fachliche Unterteilung in einen Koordinationsbereich und einen Bereich zur Trajektorienplanung ermöglicht es, neue Optimierungsfunktionen hinzufügen, indem sie in der Verhaltensebene verortet und an die Koordinationsebene angebunden werden. Für die Anbindung, die einen Aufruf der Optimierungsfunktion erst ermöglicht, muss in der Koordinationsebene das Element zur Optimierungsfunktionsauswahl entsprechend erweitert werden. Die Erweiterung dient dazu, dass bei einer passenden vorausliegenden Fahrsituation die neuen Optimierungsfunktionen aktiviert werden können. Diese Erweiterung stellt eine lokale, nicht-architektonische Änderung dar. Die ebenenbasierte Architektur eignet sich daher um sämtliche Optimierungsfunktionen darstellen und eine einfache Änderbarkeit/Erweiterbarkeit anbieten zu können.

Der vorgestellte Ansatz muss die Anforderung erfüllen, dass wenn für eine vorausliegende Fahrsituation unterschiedliche Optimierungsfunktionen in Frage kommen, die Koordinationsebene stets die kostenminimale Optimierungsfunktion aufrufen soll. Das bedeutet, dass die Koordinationsebene abschätzen muss, welche Optimierungsfunktio-

nen das kostenminimale Optimierungsergebnis liefern wird, bevor ein Aufruf stattfindet. Diese Abschätzung müsste die Koordinationsebene allein auf Grundlage der ihr zur Verfügung stehenden Vorausschauinformationen treffen. Damit würde hinsichtlich der erreichbaren energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebs eine große Abhängigkeit von dieser Abschätzung entstehen. Denn fällt die Abschätzung ungenau oder falsch aus, wird unter Umständen eine nicht energieoptimale Optimierungsfunktion aufgerufen und das Energieeinsparpotential nicht vollständig ausgeschöpft. Umgehen lässt sich das Problem dadurch, dass die Koordinationsebene die Entscheidung nicht auf Grundlage einer Abschätzung trifft, sondern zunächst alle in Frage kommenden Optimierungsfunktionen aufruft ohne diesen jedoch den Zugriff auf die Umsetzungsschnittstelle zu gewähren. Die Optimierungsfunktionen melden ihre Optimierungsergebnisse an die Koordinationsebene zurück, wo sie dann verglichen werden, um das kostenminimale Optimierungsergebnis zu erhalten. Der Optimierungsfunktion mit dem kostenminimalen Ergebnis wird dann der Zugriff auf die Umsetzungsschnittstelle freigeben.

Architektonisch hat dieser Ansatz jedoch den Nachteil, dass die Koordinations- und die Verhaltensebene häufiger miteinander intergieren müssen. Damit die Koordinationsebene ihre Planungsaufgabe nämlich erfüllen kann, ist sie auf Ergebnisse der Verhaltensebene angewiesen. Im Sinne des Separation-of-Concerns-Prinzips, nach welchem die Teilaufgaben voneinander getrennt behandelt werden sollen, stellt das einen Nachteil dar.

4.3.3 Variantenbewertung und Auswahl

Als Ansätze für Varianten der funktionalen Grobarchitektur eigenen sich grundsätzlich die nebenläufige und die ebenenbasierte Architektur. Das Hauptunterscheidungsmerkmal zwischen beiden Varianten stellt dabei der Optimierungsbereich dar. Die weiteren Bereiche der funktionalen Grobarchitektur sind in beiden Varianten vergleichbar, weshalb sich Variantenbewertung auf den Optimierungsbereich beschränkt.

Variantenbewertung

Die Variantenbewertung stellt beide Varianten nebeneinander und vergleicht sie anhand funktionaler und nichtfunktionaler Kriterien. Die im Folgenden aufgeführten Kriterien behandeln dabei die Merkmale, deren Ausprägungen zwischen beiden Architekturvarianten unterschiedlich sind.

Tabelle 4-2: Grobarchitekturvariantenbewertung anhand funktionaler Kriterien

Funktionales Kriterium	Nebenläufige Architektur	Ebenenbasierte Architektur	Bewertung
Skalierbarkeit von Optimierungs-funktionen	Ja; durch ein Arbitrierungskonzept (nachgelagerte Arbitrierung mehrerer Optimierungsergebnisse).	Ja; durch ein Planungs-konzept (überlagerte Planungsebene für Optimierungsfunk.).	Beide Varianten können den Umfang an Optimierungsfunktionalitäten skalieren.
Fahrsituationsgerechte Planung von Optimierungs-funktionen	Bedingt; reines Arbitrierungskonzept erlaubt keine Planung, Erweiterung der Arbitrierung mit Vorausschauinformationen ist notwendig.	Ja; Koordinationsebene plant auf Grundlage ihrer Vorausschauinfo. den fahrsituationsgerechten Einsatz der Optimierungs-funktionen.	Ebenenbasierter Ansatz im Vorteil, da die überlagerte Koordinationsebene vorausschauend planen kann. Nichtbenötigte Optimierungsfunktionen können ressourcenschonend pausiert werden.
Bereitstellung der kostenminimalen Trajektorien	Ja; dem Koordinationsmodul liegen alle Optimierungskennwerte vor, anhand derer die Auswahl der kostenminimalen Trajektorie getroffen werden kann. Die entsprechende Trajektorie wird anschließend durch das Koordinationsmodul durchgeleitet.	Bedingt; für eine verlässliche Bereitstellung der kostenminimalen Trajektorie müssen alle betroffenen Optimierungsfunk. zunächst ein Optimierungsergebnis an die Koordinationsebene hochmelden. Anhand der Ergebnisse bestimmt die Koordinationsebene dann das Optimierungsmodul, dessen Trajektorie umgesetzt werden soll.	Nebenläufiger Ansatz im Vorteil, da Informationsfluss nur in eine Richtung zeigt und keine mehrschrittige Interaktion zwischen Optimierungsfunktion und Koordination erforderlich ist. Dies ist vorteilhaft hinsichtlich einer kurzen Zykluszeit.

Neben der Erfüllung der funktionalen Anforderungen besteht das Ziel im Architekturentwurf eine hohe lokale Änderbarkeit, Verstehbarkeit und Testbarkeit der Systembestandteile zu erreichen. Vogel schreibt hierzu: „Wenn ein Systembaustein alle die zum Verstehen und Ändern relevanten Eigenschaften in seiner Beschreibung vereint, kann man ihn folglich ändern, ohne andere Systembausteine verstehen oder ändern zu müssen.“[172] Um dies umzusetzen, sollte eine Architektur den Prinzipien der losen Kopplung und hohen Kohäsion genügen (vgl. Kapitel 3.4). Erreicht werden kann dies vorzugsweiseh durch die Umsetzung der Prinzipien Separation-Of-Concerns und Information-Hiding.

[172] Vogel et al. (2009): Software-Architektur, S. 134

Tabelle 4-3: Grobarchitekturvariantenbewertung anhand nichtfunktionaler Kriterien

Nichtfunk. Kriterium	Nebenläufige Architektur	Ebenenbasierte Architektur
Prüfung auf Separation-of-Concerns	Eingeschränkt, da nachgelagerte Arbitrierung um vorausschaubasierten Entscheidungsmechanismus ergänzt werden muss.	Hohe Separation-of-Concerns, wenn Koordinationsebene Entscheidungen allein auf Vorausschauinformationen treffen kann. Eingeschränkt, wenn Koordinationsebene für Entscheidungen Ergebnisse aus unterlagerter Verhaltensebene benötigt.
Prüfung auf Einhaltung des Information-Hiding-Prinzips	Keine Schichten bzw. Abstraktionsebenen zur Unterstützung des Information-Hiding-Prinzips vorhanden.	Einhaltung des Information-Hiding-Prinzips durch Vorhandensein von Abstraktionsebenen grundsätzlich unterstützt.
Prüfung auf hohe Kohäsion	Für eine hohe systemweite Kohäsion ist ein breit gefasster Funktionsumfang des Arbiters erforderlich.	Hohe Kohäsion, wenn Koordinationsebene Entscheidungen allein auf Vorausschauinformationen treffen kann. Ansonsten Kohäsion eingeschränkt, wenn Entscheidungsfindung Ergebnisse aus unterlagerter Verhaltensebene benötigt.
Prüfung auf lose Kopplung	Durch die Kopplung des Arbiters an die Optimierungsfunktionen und die Umfeldrepräsentation ist bei Änderungen ein erweitertes Verständnis erforderlich. Optimierungsfunktionen sind untereinander nicht gekoppelt.	Weitestgehend lose Kopplung, wenn Koordinationsebene Entscheidungen allein auf Vorausschauinformationen treffen kann. Entscheidungen und Ausführungen können in definiertem Spielraum unabhängig voneinander geändert werden.

Sowohl das Separation-of-Concerns- als auch das Information-Hiding-Prinzip werden von dem ebenenbasierten Ansatz in einem höheren Maß unterstützt. Das gilt jedoch nur unter der Voraussetzung, wenn Entscheidungen unabhängig von Ergebnissen aus der Verhaltensebene getroffen werden können. Ist dies nicht möglich, steigt die Kopplung zwischen den Ebenen, was Änderungen im System erschwert. Eine starke Kopplung ist auch der Nachteil im nebenläufigen Architekturansatz, wenn der nachgelagerte Arbiter zur Erfüllung seiner Funktion auf Vorausschauinformationen zugreifen muss. Auch hier ist dann zur Durchführung von Änderungen ein umfangreiches Systemverständnis erforderlich

Variantenauswahl

Beide architektonischen Ansätze zeigen spezifische Vorteile in der Erfüllung der Anforderungen. Wenn es darum geht auf Vorausschau basierend die Nutzung der verfügbaren

Optimierungsfunktionen zu planen, dann ist die ebenbasierte Architektur mit ihrer übergeordneten Koordinationsebene im Vorteil. Ist hingegen eine effiziente Auswahl konkreter Optierungstrajektorien gefordert, erscheint die nebenläufige Architektur mit dem Arbitrierungsanstz als geeigneter. Da von der funktionalen Referenzarchitektur die Erfüllung beider Funktionen gefordert wird, müssten beide Ansätze jeweils auf Kosten einer losen Kopplung bzw. hohen Kohäsion erweitert werden.

Die favorisierte Lösung stellt daher eine Synthese beider Architekturvarianten dar. Diese kombinierte Architektur vereint die fahrsituationsgerechte Planung der Optimierungsfunktionen in der übergeordneten Koordinationsebene mit der Bereitstellung der kostenminimalen Trajekorien durch einen nachgelagerten Arbitrierungsansatz.

Im folgenden Kapitel wird dieser Architekturansatz detailliert vorgestellt.

4.4 Funktionale Referenzarchitektur

4.4.1 Übersicht

Abbildung 4-7: Übersicht Funktionale Referenzarchitektur zeigt die Übersicht der funktionalen Referenzarchitektur für Assistenzsysteme zur energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebs. Die Darstellung zeigt eine Ausprägung für einen hybriden Antriebstrang und einer Kombination sämtlicher Optimierungsfunktionen (Maximalausprägung).

4.4.2 Energetische Optimierung

Das Modul zur energetischen Optimierung ist gemäß dem ebenbasierten Architekturansatz in die Missionsebene, die Koordinationsebene und die Verhaltensebene unterteilt.

Die **Missionsebene** beinhaltet die Optimierungsfunktionen zur *Routenplanung* sowie zur *Fahrweisen- und SoC-Planung* im fernen Horizont. Während der finale Routenplan im Umfeldmodell und zur Routenführung mittels Navigationsinterface genutzt wird, kann die Geschwindigkeitstrajektorie entweder direkt umgesetzt werden (Geschwindigkeitsempfehlung oder Setzgeschwindigkeit) oder als Randbedingung für die Optimierungsfunktionen in der Verhaltensebene dienen. Das Ergebnis der SoC-Planung kann hingegen nur im Zusammenhang einer vorausschauendenden Betriebsmodusplanung (Verhaltensebene) oder einer externen Hybridstrategie genutzt werden. Generell gilt für die Missionsebene, dass sie nicht direkt auf die darunterliegende Koordinationsebene einwirkt, sondern diese nur mittelbar über den aus dem Umfeldmodell kommende Vorausschauhorizont beeinflusst.

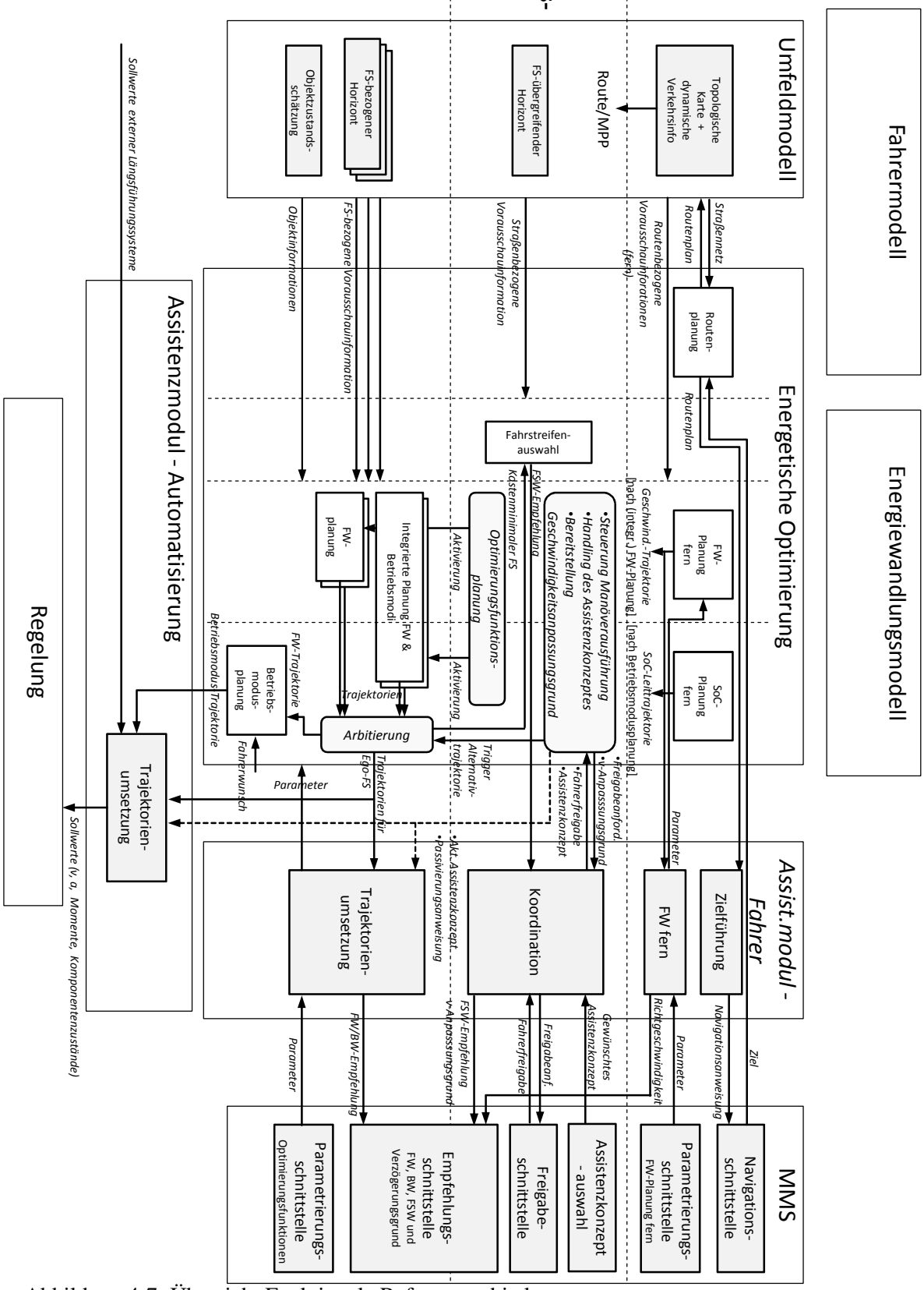

Abbildung 4-7: Übersicht Funktionale Referenzarchitektur

Liegt der **Koordinationsebene** der Vorausschauhorizont vor, d.h. ist bekannt, welche Fahrsituationen vorausliegen, kann die Subfunktion zur *Optimierungsfunktionsplanung* eine fahrsituationsgerechte Nutzung der Optimierungsfunktionen festlegen. Hierfür muss der Optimierungsfunktionsplanung bekannt sein, für welche Fahrsituationen welche Optimierungsfunktionen grundsätzlich zulässig sind. Diese Optimierungsfunktionen, die in der Verhaltensebene verortet sind, werden dann über ein entsprechendes Aktivierungssignal aktiviert. Mit der Subfunktion *Steuerung Manöverausführung* kann die Ausgabe von Optimierungsergebnissen unterbrochen bzw. pausiert werden, wenn das Fahrzeug vor einer Haltelinie zum Stehen gekommen ist. Die Ausgabe wird dabei so lange unterbrochen, bis die Freigabe zur Weiterfahrt vorliegt (vgl. Kapitel 4.1.3). Aus diesem Grund muss die Steuerung der Manöverausführung auch in der Lage sein die Ausgabe einer Freigabeaufforderung in Richtung Freigabeinstanz aktiv zu triggern. Die Unterbrechung der Ausgabe der Optimierungsergebnisse erfolgt durch das Assistenzmodul, weshalb dieses mit einer entsprechenden Steuerungsschnittstelle ausgestattet sein muss. Die Unterbrechung der Ausgabe erfolgt nicht durch die temporäre Deaktivierung der Optimierungsfunktionen, sodass diese auch im Stillstand ihre Ergebnisse stets aktualisieren können, wenn sich beispielsweise das Umfeld ändert, solange das Fahrzeug steht. Liegt eine Fahrerfreigabe bereits vor Erreichen der Haltelinie vor, so soll das Fahrzeug nicht, wie in der ursprünglichen Trajektorie geplant, zum Halten kommen, sondern die Kreuzungssituation direkt passieren. Für die Steuerung der Manöverausführung bedeutet dies, dass sie die Ausführung der ursprünglich optimalen Trajektorie unterbrechen und die Ausgabe einer Alternativtrajektorie ohne Halt ansteuern muss. Eine solche Alternativtrajektorie kann beispielsweise eine Übergangstrajektorie mit einem vordefinierten Geschwindigkeitsprofil oder eine Optimaltrajektorie, die den Haltepunkt nicht berücksichtigt, sein.

Um den Fahrer zu informieren, aus welchem Grund eine Geschwindigkeitsanpassung automatisiert erfolgt oder empfohlen wird, leitet die Subfunktionen *Bereitstellung Geschwindigkeitsanpassungsgrund* aus den Vorausschauinformationen die entsprechende Information ab und triggert über das Assistenzmodul eine Ausgabe über die MMS an. So wird der Fahrer auch frühzeitig darauf hingewiesen, wenn für die vorausliegende Situation eine Fahrergabe erforderlich sein wird.

Ebenfalls aus der Koordinationsebene heraus erfolgt die Triggerung der Ausgabe einer Fahrstreifenwechselempfehlung. Die dafür zuständige Subfunktionen *Fahrstreifenauswahl* bekommt hierfür aus der Verhaltensebene den kostenminimalen Fahrstreifen hochgemeldet oder bestimmt diesen auf Grundlage von Vorausschauinformationen in einem separaten Submodul auf der Koordinationsebene selbst. Kommt in einem anschließenden Vergleich heraus, dass der aktuell befahrene Fahrstreifen nicht dem kostenminimalen Fahrstreifen entspricht, wird ein Fahrstreifenwechsel empfohlen. Für diese Entscheidung können weitere Umfeldinformationen berücksichtigt werden, die eine fahrsituationsgerechte Ausgabe ermöglich. Endet beispielsweise der Zielfahrsteifen

demnächst, so kann eine Fahrstreifenwechselempfehlung ausgesetzt werden, da gegebenenfalls der energetische Nutzen des Fahrstreifenwechsels die zusätzliche Fahrerbelastung nicht aufwiegt. Da diese Betrachtung eine übergreifende Entscheidung darstellt, die auf fahrstreifenübergreifende Vorausschauinformationen angewiesen ist, ist die Subfunktion auf Koordinationsebene anstatt auf der Verhaltensebene angesiedelt.

Da die Aktivierung der Optimierungsfunktionen sowie die Ansteuerung von Empfehlungen bzw. einer automatisierten Ausführung vom gewählten Assistenzkonzept abhängen, beinhaltet die Koordinationsebene auch die Funktionen zum *Handling des Assistenzkonzeptes*. Als Grundlage dient dabei die Information zum gewünschten Assistenzkonzept, die durch das Assistenzmodul verwaltet und bereitgestellt wird.

In der untersten Ebene, der **Verhaltensebene**, sind schließlich die *Optimierungsfunktionen* verortet, die die Trajektorien bzw. Sollwerte zur Fahrweise und Betriebsmodi vorausschauend planen. Welche Optimierungsfunktionen aktiv sein soll, wird durch die die Optimierungsfunktionsplanung in der Koordinationsebene festgelegt. Eine Ausnahme bildet die Optimierungsfunktion zur vorausschauenden Betriebsmodusplanung, die nicht aktiviert werden muss, sondern stets parallel mitzulaufen soll[173]. Diese Forderung ist dadurch bedingt, dass, wenn der Fahrer bei aktivierter automatisierter Längsführung (wird durch die integrierte Planung gespeist, vgl. Kapitel 4.1.2 Optimierungsfunktionen) die Längsführung wieder selbst übernimmt, die optimalen Sollwertvorgaben für den hybriden Antriebsstrang unterbrechungsfrei bereitgestellt werden müssen. Um dies zu erreichen, wird bei Fahrerübernahme im Assistenzmodul zwischen den Ergebnissen der integrierten Planung und der Betriebsmodusplanung gewechselt, anstatt die Betriebsmodusplanung erst bei Bedarf zu aktivieren. Dies birgt nämlich die Gefahr, dass zwischen Aktivierung der Betriebsmodusplanung und Ausgabe von Sollwerten durch den Rechenzeitbedarf eine unerwünschte Unterbrechung auftreten kann.

Die aktivierten Optimierungsfunktionen bestimmen auf Grundlage der ihnen vom Umfeldmodell bereitgestellten fahrstreifenbezogenen elektronischen Horizonte und Objektlisten die optimalen Fahrweisen- und Betriebsmodustrajektorien und geben diese an die *Arbitrierung* weiter. Die Arbitrierung bestimmt nun aus den verfügbaren Optimierungsergebnissen eine Reihenfolge hinsichtlich der Kosten und leitet zwecks Umsetzung die kostenminimale Trajektorie für den aktuell befahrenen Fahrstreifen weiter. Gleichzeitig meldet es den kostenminimalen Fahrstreifen an die Koordinationsebene zurück, sodass diese ggf. über eine Fahrstreifenwechselempfehlung entscheiden darf. Aus der Koordinationsebene bekommt die Arbitrierung den Trigger, falls eine Alternativtrajektorie ausgewählt werden muss.

[173] Diese Anforderung gilt für den Fall, wenn ein hybrider Antriebsstrang vorliegt und eine Optimierung sowohl bei ausführender als auch bei empfehlender Assistenz vorgesehen ist.

4.4.3 Umfeldmodell

Die Aufgabe des Umfeldmodells besteht darin, eine konsistente und fusionierte Repräsentation des Fahrzeugumfeldes für das Modul Energetische Optimierung bereitzustellen. Es ist der Struktur der Energetischen Optimierung entsprechend in ein Missionsebene, Koordinationsebene und Verhaltensebene unterteilt. Gespeist wird es von der Informationsbereitstellung z.B. mittels bordautarker Sensorik (z.B. Radar), Kommunikationssystemen (Car2X) und digitalen Karten mit GNSS-basierter Eigenlokalisation.

Auf **Missionsebene** stellt das Umfeldmodell eine topologische Karte des Straßennetzwerkes zur Verfügung. Die Karte kann zusätzlich mit dynamischen Verkehrsinformationen angereichert werden und dient als Grundlage für die Routenplanung im Modul Energetische Optimierung. Ist eine Route geplant, wird sie im Umfeldmodell für die für die Ableitung der elektronischen Horizonte verwendet. Ist keine Route geplant, kann hierfür der von der digitalen Karte bereitgestellte Most-Probable-Path (MPP) verwendet werden. Dieser repräsentiert den wahrscheinlichsten Routenverlauf für die nächsten Kilometer. Auf Grundlage der geplanten Route kann das Umfeldmodell auf der Missionsebene auch eine Streckenvorausschau bis zum Ziel bereitstellen. Diese Information ist für mögliche Optimierungsfunktionen zur fernen Fahrweisen- und SoC-Planung vorgesehen.

Für die Optimierungsfunktionen der **Verhaltensebene** stellt das Umfeldmodell die Vorausschauinformationen in Form von elektronischen Horizonten zur Verfügung. Es ist vorgesehen, dass für jede Optimierungsfunktion ein individueller elektronischer Horizont bereitgestellt wird, der die jeweils relevanten Informationen in der benötigten Vorausschauweite enthält. Als Variante hierzu ist es denkbar, einen gemeinsamen generischen elektronischen Horizont bereitzustellen, aus dem dann in der Energetischen Optimierung die jeweils relevanten Attribute extrahiert werden. Dies böte den Vorteil, dass die funktionale Schnittstelle zwischen Umfeldmodell und Energetischer Optimierung verschlankt würde, jedoch hätten Anpassungen z.B. durch eine Erweiterung um zusätzliche Vorausschauattribute unter Umständen Auswirkungen auf bereits existierende Optimierungsfunktionen. Beide Varianten sind denkbar und sollten bei einer Anwendung der Referenzarchitektur in einer konkreten Systementwicklung abgewogen werden.

Für Optimierungsfunktionen speziell im Nahbereich, wie beispielsweise die energetische Optimierung der Annäherung an vorausfahrende Fahrzeuge (Eco-ACC), werden neben dem elektronischen Horizont zusätzlich Informationen mit expliziten Objekteigenschaften bereitgestellt. Hierfür muss das Umfeldmodell entsprechende Funktionen zur Schätzung dieser Objekteigenschaften basierend auf den unterschiedlichen Sensorinformationen enthalten.

Zur Erfüllung der Aufgaben auf der mittleren **Koordinationsebene** wird vom Umfeldmodell eine weitere Darstellung des Umfeldes benötigt. Diese Darstellung muss Informationen zur Anzahl und zum Verlauf von Fahrstreifen, sowie die Positionen, Arten und Zustände von relevanten Verkehrsinfrastrukturelementen enthalten. Auch die geltende Verkehrsregelung (z.B. zur Vorfahrtsregelung) sowie Informationen zu Verkehrsmitteln (z.B. Position, Geschwindigkeit) sollte die Darstellung beinhalten, da auf Grundlage dieser Vorausschauinformationen auf der Koordinationsebene (je nach Systemausprägung) die die Nutzung der Optimierungsfunktionen geplant und gesteuert wird.

Da die Zustände dynamischer Objekt zeitinvariant sind, umfasst das Umfeldmodell auch Subfunktionen zur Zustandsprädiktion, wie z.B. der Längsdynamikprädiktion einzelner Verkehrsmittel oder der Prädiktion ganzer Verkehrssituation. Einen weiteren Bestandteil im Umfeldmodell stellt die Situationsinterpretation dar. Die Situationsinterpretation analysiert, welche Relationen zwischen den Entitäten in einer Szene vorherrschen und beschreibt diese anhand bestimmter Attribute wie z.B. der Fahrstreifenwechselwahrscheinlichkeit. Diese Informationen können in der Zustandsprädiktion genutzt werden, um die Prädiktionsgüte zu steigern.

4.4.4 Energiewandlungsmodell

Die zur Modellierung der Fahrdynamik, der Fahrwiderstände und der Energieflüsse inklusive der auftretenden Energieverluste notwendigen Parameter werden als fahrzeugspezifische Datensätze durch das Energiewandlungsmodell bereitgestellt. Dabei handelt es sich um technische Daten von Fahrzeug und Antriebsstrang und um die Energieflussbzw. Verbrauchscharakteristik des gesamten Fahrzeugs.

Die technischen Parameter beinhalten die spezifischen Kennwerte des Fahrzeuges, wie beispielsweise die Fahrzeugmasse, Widerstandsbeiwerte oder die Betriebsgrenzen des Antriebs etwa hinsichtlich Motordrehzahl und Motorleistung. Die Energiefluss- bzw. Verbrauchscharakteristik umfasst die Berechnungsvorschriften etwa für den Kraftstoffbedarf abhängig vom jeweiligen Arbeitspunkt.

Das Energiewandlungsmodell kann verschiedene Modellierungen für die einzelnen Optimierungsebenen enthalten. Dabei unterscheiden sich die Modellierungen durch die Modellierungstiefe, die durch die jeweilige Optimierung bestimmt wird.

4.4.5 Fahrermodell

Mit Hilfe des Fahrermodells wird das menschliche Fahrverhalten sowohl des Ego-Fahrers der anderen Verkehrsteilnehmer abgebildet. Diese Modellierungen werden in der Prädiktion genutzt um sowohl die Fahrweise des Egofahrzeuges (bei nicht vorhan-

dener/aktivierter Automatisierung der Längsführung) als auch die Fahrweisen der anderen Fahrzeuge prädizieren zu können. Zusätzlich kann die Fahrerbeschreibung auch eine Akzeptanzmodellierung beinhalten, die genutzt wird zur Bestimmung, in welchem Maße unterschiedliche energieoptimierter Fahr- und Betriebsweisen durch Fahrer akzeptiert werden.

4.4.6 Assistenzmodul

Die Hauptaufgabe des Assistenzmoduls besteht darin, die Ergebnisse der energetischen Optimierung in Fahrerempfehlungen und Sollwerte für die Regelung umzusetzen. Hierfür ist das Assistenzmodul zweigeteilt in das *Assistenzmodul Fahrer* und das *Assistenzmodul Automatisierung*. Die Zweiteilung ist funktional begründet, da die jeweiligen Submodule zur *Trajektorienumsetzung* unterschiedliche Umsetzungsschnittstellen bedienen. So besteht das Ziel der Trajektorienumsetzung für die Automatisierung darin, aus der anliegenden Fahrweisen- bzw. Betriebsmodustrajektorie die Sollwerte für die Längsregelung in Form von Sollgeschwindigkeit, Sollbeschleunigung, Sollmomenten sowie den Sollzuständen der Komponenten abzuleiten und bereitzustellen. Darüber hinaus ist die Trajektorienumsetzung für die Überblendung von Trajektorien notwendig sowie für eine Unterbrechung der Ausgabe von Sollwerten im Falle einer Passivierungsanweisung kommend aus der Steuerung der Manöverausführung. Werden durch externe Systeme zur Längsführung (z.B. konventionelles ACC-System) Sollwerte bereitgestellt, so erfolgt die Koordination ebenfalls im der automatisierungsseitigen Trajektorienumsetzung.

Die fahrerseitige Trajektorienumsetzung hat die Aufgabe aus den Ergebnistrajektorien die Fahr- und Betriebsweisenempfehlungen abzuleiten und sie der Empfehlungsschnittstelle bereitstellzustellen **(Verhaltensebene)**. Die Trajektorienumsetzung legt fest, welche Empfehlung wann angezeigt wird und kann die Ausgabe auch situationsgerecht unterdrücken z. B. bei Eingriffen von Sicherheitssystemen. Neben der Bereitstellung der Empfehlungen ist die Trajektorienumsetzung auch für die Verwaltung der Parameter zuständig, mit welchen der Fahrer die Optimierungsfunktionen der Verhaltensebene beeinflussen kann. Ergänzt wird die Trajektorienumsetzung durch das Submodul *Koordination*, das der **Koordinationsebene** zugeschrieben wird und für die Ansteuerung der Ausgabe einer Fahrstreifenwechselempfehlung und des Geschwindigkeitsanpassungsgrundes zuständig ist. Darüber hinaus koordiniert das Submodul die Fahrerfreigaben im Rahmen der Manöverausführung und prüft, welches Assistenzkonzept seitens des Fahrers gefordert ist.

Vervollständigt wird das fahrerseitige Assistenzmodul auf der **Missionsebene** durch Submodule im Rahmen der fernen Fahrweisenplanung und zur Zielführung. Das Submodul *FW fern* übernimmt die Koordination und Parametrierung für die ferne Fahrweisenplanung sowie die Aufbereitung der Optimierungsergebnisse. Die *Zielfüh-*

rung übersetzt schließlich die ausgewählte Route in Navigationsanweisungen und ermöglicht es somit einer Route zu folgen[174].

4.4.7 Mensch-Maschine-Schnittstelle

Die Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) besitzt die Aufgabe, die durch das fahrerseitige Assistenzmodul bereitgestellten Informationen für den Fahrer auszugeben bzw. angefragte Informationen vom Fahrer entgegenzunehmen. Dafür kann die MMS funktional unterteilt werden in eine Empfehlungsschnittstelle, eine Freigabeschnittstelle, eine Schnittstelle für die Assistenzkonzeptauswahl, Parametrierungsschnittstellen für die Optimierungsfunktionen und eine Navigationsschnittelle. Während über Empfehlungsschnittselle die Ausgabe von Empfehlungen zur energieoptimalen Fahrweise, Betriebsweise und zum Fahrstreifenwechsel erfolgt, werden über die Navigationsschnittstelle die Anweisungen zum Folgen einer energieeffizienten Route bereitgestellt. Die restlichen Schnittstellen dienen dazu, den Fahrer mit weiteren Informationen zu versorgen (z.B. Geschwindigkeitsanpassungsgrund), ihn zu einer Handlung aufzufordern (Freigabe) oder Informationen entgegenzunehmen (gewünschtes Assistenzkonzept, Parameter).

---

[174] Kleine-Besten et al (2015):Navigation und Verkehrstelematik, S. 1049

5 Architekturbewertung

Die Grundlage für den Entwurf der vorliegenden funktionalen Referenzarchitektur bilden die geforderten funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen. Während aus den funktionalen Anforderungen abgleitet wird, welche Funktionen eine Architektur überhaupt berücksichtigen muss, geben die nichtfunktionalen Anforderungen einen Aufschluss darüber, in welcher Art und Weise bzw. wie „gut“ dies zu geschehen hat. Die Qualität einer Architektur spiegelt sich somit im Erfüllungsgrad der nicht-funktionalen Anforderungen wider[175], was sich aus den Zielen der im Folgenden vorgestellten Bewertungsverfahren ableiten lässt. Die Erfüllung funktionaler Anforderungen scheint hingegen bei der Architekturbewertung keine Rolle zu spielen, was darauf schließen lässt, dass diese schlicht vorausgesetzt wird[176].

Eine qualitative Architekturbewertung kann als ein Soll-Ist-Vergleich verstanden werden, bei dem die Qualitätsanforderungen beziehungsweise Architekturziele das Soll darstellen und mit dem Architekturentwurf verglichen werden[177]. Dieser Vergleich kann grundsätzlich drei verschiedene Ergebnisse erzielen:

1. *Soll* stimmt mit *Ist* überein – die Architektur bzw. deren Umsetzung erfüllt die spezifischen Eigenschaften.
2. *Soll* stimmt in mehreren Qualitätsanforderungen nur teilweise mit *Ist* überein – einzelne Merkmale müssen auf Kosten anderer verbessert (es sind Kompromisse notwendig).
3. Einzelne Qualitätsanforderungen können im *Ist* nicht erreicht werden (Risiko) oder werden nicht erreicht (Problem, eingetretenes Risiko).

Sämtliche im Folgenden vorgestellten Bewertungsverfahren zielen darauf, mögliche Risiken zu identifizieren, die Zweckmäßigkeit des Architekturentwurfes zu analysieren und somit die gewählte Architektur abzusichern. Ein unreflektierter Einsatz einer Architektur sollte nicht stattfinden, denn eine (Software-)Architektur eines Systems besitzt einen erheblichen Einfluss auf die Qualitätsmerkmale eines Gesamtsystems und stellt einen kritischen Erfolgsfaktor sowohl für die Entwicklungs- als auch Nutzungsphase des Systems dar[178].

---

[175] Diese werden daher auch als Qualitätsattribute oder Qualitätsmerkmale bezeichnet

[176] Lotz (2016): Eine Referenzarchitektur für die assistierte und automatisierte Fahrzeugführung, S. 15

[177] Starke (2014): Effektive Softwarearchitekturen, S. 280

[178] Eicker et al. (2007): Auswahl von Bewertungsmethoden für Softwarearchitekturen, S.i

5.1 Vorgehen zur Architekturbewertung

5.1.1 Bewertungsverfahren von Systemarchitekturen

Für die Beurteilung bzw. Bewertung von Architekturen stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Gemäß Starke[179] fallen Architekturen dabei in die Kategorie der Artefakte, zu der auch Anforderungen, Quellcode oder Dokumente gehören. In Abgrenzung dazu können in Software-Projekten auch Prozesse, wie etwa Entwicklungs- oder Betriebsprozesse hinsichtlich organisatorischer Aspekte oder dem Einsatz von Ressourcen bewertet werden. Daraus allerdings auf die auf die Qualität der entwickelten Systeme zu schließen, ist kaum möglich.

Die Bewertung von Artefakten kann qualitativ, also ihrer Beschaffenheit oder Güte nach, oder quantitativ, d.h. in Zahlen, erfolgen. Quantitativ lassen sich jedoch nur wenige Artefakte bewerten, wie beispielsweise Quellcode, der hinsichtlich der Anzahl der Programmzeilen, des notwendige Speicherbedarfs oder der Anzahl der implementierten Funktionen pro Zeiteinheit geprüft werden kann[180]. Da der Quellcode jedoch erst spät im Entwicklungsprozess zur Verfügung steht, wächst das Risiko, dass qualitative Defizite im Systementwurf auch erst entsprechend spät im Entwicklungsprozess erkannt bzw. grundlegende strukturelle Schwachstellen möglicherweise überhaupt nicht aufgedeckt werden[181]. Starke legt den Fokus der Bewertung einer Architektur daher auf die qualitative Bewertung.

Für eine Beurteilung der Architektur stellt Vogel[182] eine Reihe grundsätzlicher Methoden vor. Neben einfachen Methoden, wie Präsentationen, formalen Reviews und Walkthroughts, die das Ziel haben, die Architektur den Interessenvertretern näher zu bringen und sich von Ihnen Feedback einzuholen, werden auch Simulationen und Architekturprototypen vorgeschlagen. Diese Methoden verfolgen das Ziel das System anhand von rudimentären Bausteinen zu implementiert, sodass die wichtigsten Abläufe prototypisch ausprobiert werden können. Wenn dabei sämtliche relevanten Systembausteine zum erfolgreichen Zusammenspiel gebracht werden, wird oft vom sogenannten architektonischen „Durchstich“ gesprochen[183].

---

[179] Starke (2014): Effektive Softwarearchitekturen, S. 280

[180] Starke (2014): Effektive Softwarearchitekturen, S. 289

[181] Starke (2014): Effektive Softwarearchitekturen, S. 290

[182] Vogel et al. (2009): Software-Architektur, S. 399-401

[183] Vogel et al. (2009): Software-Architektur, S. 400

Ein Hilfsmittel, das für verschiedene Bewertungsmethoden genutzt werden kann, stellen Checklisten dar. Checklisten enthalten detaillierte Fragen, die die Umsetzung der unterschiedlichen qualitativen Anforderungen adressieren[184] und so dabei unterstützen, dass die relevanten Fragestellungen nicht übersehen werden.

Eine in der Literatur häufig zu findende Gruppe stellen die Methoden zur szenariobasierten Bewertung von Softwarearchitekturen dar. Beispielsweise geben Ionita et al.[185] sowie Eicker et al.[186] hierzu eine ausführliche Übersicht. Die verbreitetesten Verfahren stellen dabei die S*oftware Architecture Analysis Method* (SAAM)[187] und die daraus weiterentwickelte *Architecture Tradeoff Analysis Method* (ATAM)[188] dar. Beide Verfahren beruhen auf dem Grundprinzip der Erarbeitung von konkreten Szenarien, die nichtfunktionale Anforderungen bzw. Qualitätsmerkmale konkretisieren. Die ATAM geht dabei formaler vor, weil hier zunächst relevante Qualitätsmerkmale nach ihrer Wichtigkeit sortiert und in einem sogenannten Qualitätsbaum („utility tree“) strukturiert werden. Für jedes der Qualitätsmerkmale wird im Anschluss mindestens ein konkretes Szenario definiert, mit Hilfe dessen das jeweilige Merkmal untersucht werden kann. Diese Szenarien werden angelehnt an Bass et al.[189] als *Qualitätsattributsszenarien* bezeichnet. Ziel der Formulierung sollte es sein, die Szenarien möglichst konkret und operationalisiert zu halten[190] weshalb sie in einem vorgegebenen Dokumentationsschema beschrieben werden sollten (vgl. Tabelle 5-1).

Nach der Szenariendefinition wird in Form eines Walkthroughts untersucht, wie die Bausteine der Systemarchitektur zur Erreichung der Szenarien zusammenspielen bzw. welche Entwurfsentscheidungen das jeweilige Szenario unterstützen. Das Resultat der Methode ist eine Übersicht, wie gut die Szenarien von der Architektur unterstützt werden („Sensitivity“), welche qualitätsbezogenen Kompromisse eingegangen wurden („Tradeoff“) und welche Risiken sich daraus ergeben („Risk“)[191].

---

[184] Am Beispiel der Anforderung „Erweiterbarkeit“ kann die Frage lauten: „Erlaubt es die Architektur, dass man nachträglich eine zusätzliche Web-Benutzeroberfläche zur Verfügung stellen kann?“ (vgl. Vogel et al. (2009): Software-Architektur, S. 401)

[185] Ionita et al. (2002): Scenario-Based Software Architecture Evaluation Methods

[186] Eicker et al. (2007): Auswahl von Bewertungsmethoden für Softwarearchitekturen

[187] Kazman et al. (1996):Scenario-Based Analysis of Software Architecture

[188] Kazman et al (2000): ATAM: Method for Architecture Evaluation

[189] Bass et al. (2013): Software Architecture in Practice, S. 61 - 270

[190] Starke (2014): Effektive SW-Architekturen, S. 286

[191] Kazman et al (2000): ATAM: Method for Architecture Evaluation, S. 21

Tabelle 5-1: Dokumentationsschema von Qualitätsattributszenarien nach Vogel et al.[192] mit Beispiel für Änderbarkeit nach Bass et al.[193]

Kriterium	Bedeutung	Beispiel
Quelle	System oder Benutzer, der ein Ereignis bzw. Stimulus generiert.	Entwickler
Stimulus	Ereignis, auf welches das System reagieren muss.	Auftrag zum Anpassen des User Interface
Artefakt	Der Teil des Systems, der von dem eintreffenden Ereignis betroffen ist.	Code
Kontext/Umfeld	Beschreibt den Kontext, in dem das Ereignis eintrifft. Z. B.: „System befindet sich im Normalzustand“.	Design, Zeit
Reaktion	Beschreibt die Aktivität, die der Stimulus im System auslöst.	Ändern und anschließendes Testen des SW-Moduls
Reaktionsmessgröße	Beschreibt die Messgröße sowie die Art und Weise, wie der Erfolg bzw. Misserfolg der erfolgten Reaktion zu messen ist.	Maximal 3 Arbeitsstunden

Wie die ATAM nutzt auch die SAAM Qualitätsattributsszenarien. In der SAAM erfolgt jedoch keine Aufstellung eines Qualitätsbaumes und keine detaillierte Sensitivity- und Tradeoff-Analyse, weil bei der SAAM die Beziehungen zwischen den Entwurfsentscheidungen der Architektur und den beeinflussen Qualitätsmerkmalen wesentlich weniger detailliert untersucht werden als bei der ATAM[194]. Der Fokus bei der SAAM liegt daher eher darauf, mehrere Architekturvarianten schnell auf ihre Tauglichkeit („Suitability“) hin zu überprüfen, wobei als Ergebnis eine qualitative Aussage entsteht, ob eine Architekturvariante das Szenario prinzipiell unterstützt oder nicht. Vor dem Hintergrund, dass für die SAAM keine Architekturansätze identifiziert und Qualitätsbäume aufgestellt werden müssen, ist die SAAM leichter anzuwenden und erfordert kaum Erfahrung[195].

[192] Vogel et al. (2009): Software-Architektur, S. 196

[193] Bass et al. (2013): Software Architecture in Practice, S. 120

[194] Eicker et al. (2007): Auswahl von Bewertungsmethoden für Softwarearchitekturen, S.3

[195] Eicker et al. (2007): Auswahl von Bewertungsmethoden für Softwarearchitekturen, S.7

5.1.2 Vorgehen zur qualitativen Bewertung der funktionalen Referenzarchitektur

Für die Bewertung der vorliegenden funktionalen Referenzarchitektur wird ein Vorgehen angewendet, das sich an die Methode der szenariobasierten Architekturbewertung anlehnt. Ziel dieses Vorgehens ist es, die relevanten Diskussionspunkte zu identifizieren, anhand derer der vorliegende Architekturentwurf qualitativ diskutiert werden kann. Die Durchführung einer reinen ATAM bzw. SAAM wird im Rahmen dieser Arbeit nicht erwogen, da beide Methoden ihren Fokus auf die Bewertung von reinen Softwarearchitekturen legen und entsprechend realisierungsbezogene Architekturentwürfe als Eingabe benötigen.

Ebenfalls wird im Rahmen dieser Arbeit auf die Durchführung eines prototypischen Durchstiches verzichtet, da dieser lediglich *eine* exemplarische Anwendung der Referenzarchitektur simuliert. Mittels einer exemplarischen Anwendung lässt sich keine belastbare Aussage hinsichtlich der Eignung der Architektur als Referenz treffen. Hierfür wären zahlreiche Anwendungen der Referenzarchitektur notwendig, die aufgrund des hohen Implementierungsaufwandes jedoch in dieser Arbeit nicht durchgeführt werden. Anlehnt an die Empfehlung von Starke[196] erfolgt die Bewertung der vorliegenden funktionalen Referenzarchitektur daher rein qualitativ und anhand der für die Architektur geforderten Qualitätsmerkmale.

Das vorgeschlagene Vorgehen zur Bewertung der funktionalen Referenzarchitektur besteht aus folgenden Teilschritten:

1. Ableitung eines Qualitätsbaums aus den geforderten nichtfunktionalen Anforderungen (vgl. Kapitel 3.4.2)
2. Verfeinerung der Qualitätsanforderungen in Form von Szenarien unter Beachtung der Entwicklungsszenarien (vgl. Kapitel 3.1.2)
3. Identifikation der im Architekturentwurf vorliegenden Architekturansätze
4. Analyse und Diskussion, inwieweit die vorliegenden Architekturansätze die Erfüllung der Qualitätsszenarien unterstützen

[196] Starke (2014): Effektive SW-Architekturen, S. 290

5.2 Bewertungsauslegung

5.2.1 Qualitätsbaum

Die an die Referenzarchitektur gestellten nichtfunktionalen Anforderungen sind *Funktionalität, Änderbarkeit und Testbarkeit* (vgl. Kapitel 3.4.2). Diese Qualitätsmerkmale werden im Qualitätsbaum verfeinert und resultieren in Szenarien, hinsichtlich derer die vorliegende Architektur im weiteren Verlauf diskutiert werden kann. Der Schwerpunkt bei der Erstellung des Qualitätsbaums liegt dabei bei den entwicklungsprozessrelevanten Qualitätsmerkmalen. Das bedeutet, dass hierbei die Eigenschaften der Referenzarchitektur hinsichtlich ihres Nutzens bei einer Systementwicklung im Fokus liegen. Ein Qualitätsbaum kann jedoch auch um nutzungsprozessorientierte Qualitätsmerkmale ergänzt werden. Diese Merkmale adressieren dann die Aspekte, wie sich der Architekturentwurf beispielsweise auf die Performance, die Zuverlässigkeit oder die Verfügbarkeit eines späteren Systems während des Betriebes auswirken kann. Um solche Aspekte jedoch konkret bewerten zu können, eignen sich realisierungsnähere Architektursichten (wie etwa eine Softwarearchitektur) verglichen mit der vorliegenden funktionsorientieren Architektursichten besser. Begründet werden kann dies darin, dass die betriebsrelevanten Qualitätsmerkmale deutlich stärker von Implementierungsentscheidungen abhängen, die in entsprechend realisierungsnahen Architekturen dokumentiert sind.

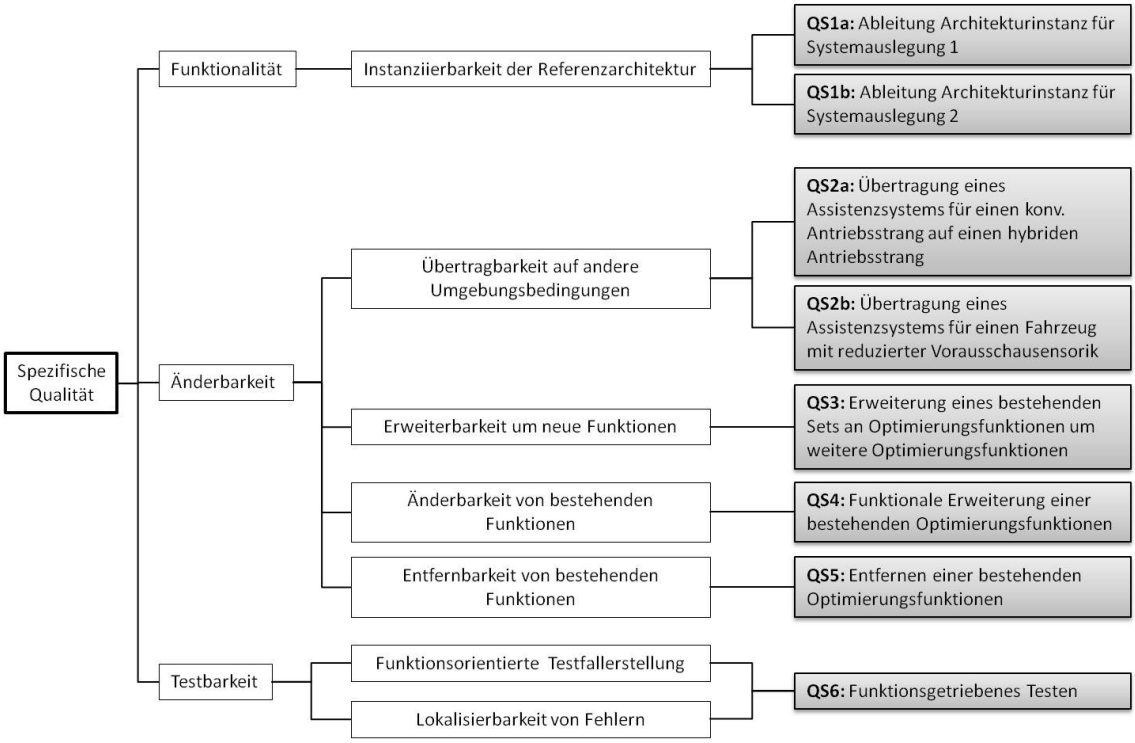

Abbildung 5-1: Qualitätsbaum mit abgeleiteten Qualitätsszenarien (QS)

Die Blätter des in Abbildung 5-1 darstellten Qualitätsbaumes repräsentieren die im nächsten Abschnitt erläuterten Qualitätsszenarien.

5.2.2 Qualitätsszenarien

Die Qualitätsszenarien werden in einem an Tabelle 5-1 angelehnten Dokumentationsschema mit den Kriterien *Ausgangslage*, *Stimulus und Quelle*, *Artefakt* und *Soll-Ergebnis* beschrieben. Das Kriterium Soll-Ergebnis beschreibt dabei qualitativ, wie die Referenzarchitektur die einzelnen Szenarien unterstützen soll, und kann als Aggregation der Kategorien Reaktion und Reaktionsmessgröße verstanden werden. Im Kontext der hier betrachteten funktionalen Referenzarchitektur erfolgt keine Festlegung von operationalisierbaren Reaktionsmessgrößen, da diese sich primär aus anwenderbezogenen Zielen ableiten[197] und meistens die Dimensionen Zeit und Kosten haben.

Die detaillierte Dokumentation der einzelnen Szenarien gemäß Dokumentationsschema kann Anhang B entnommen werden. Im Folgenden werden die Szenarien in verkürzter Form beschrieben.

Funktionalität

Mit dem verfeinerten Qualitätsmerkmal der Instanziierbarkeit wird beschrieben, in welchem Umfang sich aus der funktionalen Referenzarchitektur einzelne Architekturinstanzen für konkrete Systeme aus dem Anwendungsbereich der energetischen Optimierung ableiten lassen. Dieses Qualitätsmerkmal adressiert daher eine initiale Entwicklung, wie sie im Entwicklungsszenario 1 (vgl. Kapitel 3.1.2) beschrieben wird. Als ein einzelnes Qualitätsszenario wird dabei die Ableitung einer konkreten Architekturinstanz aus der Referenzarchitektur definiert. Als allgemeingültiges Ergebnis wird in den Szenarien gefordert, dass sich sämtliche Systemausprägungen, die als funktionale Anforderungen in den Entwurf der Referenzarchitektur eingeflossen sind, ohne eine Anpassung der selbigen darstellen lassen.

Da eine Ableitung sämtlicher in Frage kommender Architekturinstanzen aufgrund des Aufwandes im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt wird, werden zwei exemplarische Systemausprägungen betrachtet. Die beiden Systeme werden so ausgelegt, dass sie sich hinsichtlich Antriebsstrang, Optimierungsfunktionen und Assistenzansatz deutlich unterscheiden. Während *Systemausprägung A* einen Maximalansatz mit allen Optimierungsansätzen von fern bis nah für einen hybriden Antriebsstrang darstellt, enthält *Systemausprägung B* eine Optimierungsfunktionen zum vorausschauenden Fahren auf

[197] Starke (2014): Effektive SW-Architekturen, S. 286

Basis von Kartendaten („eco-Tempomat“) und eine Optimierungsfunktion zum Passieren von LZA („Ampelassistent“) für einen konventionellen Antriebsstrang.

Tabelle 5-2: Abzubildende Systemausprägungen zur Bewertung der Funktionalität der Referenzarchitektur

	Antriebs-strang	**Optimierungsfunktion**[198]	**Assistenzansatz**
System-ausprä-gung A	Hybrider Antriebs-strang	*Ferner Horizont:* 1) Routenplanung 2) Fahrweisenplanung fern 3) SoC-Planung fern	1)= empfehlend 2) = ausführend oder empfehlend 3) = ausführend
		Mittlerer/naher Horizont: 4) Integrierte Planung der Fahrweise und Betriebsmodi für mehrere Fahrsteifen für Vorausschauklasse I bis IV (konstante Verkehrsinfrastruktur, Verkehrsmittel und dynamische Verkehrsinfrastruktur im nahen und mittleren Horizont, Verkehrsinformation)	4) = ausführend oder empfehlend
System-ausprä-gung B	Konventioneller Antriebs-strang mit automatischem Getriebe	*Mittlerer/naher Horizont:* 1) Integrierte Planung der Fahrweise und Betriebsmodi für aktuell befahrenen Fahrstreifen für Vorausschauklasse I (konstante Verkehrsinfrastruktur) 2) Fahrweisenplanung für Vorausschauklasse IIIb (dynamische Verkehrsinfrastruktur im mittleren Horizont (d.h. vorausliegende LZA))	1) = ausführend 2) = ausführend oder empfehlend

Die Kurzbeschreibung der entsprechenden Qualitätsszenarien (QS) lautet wie folgt:

- **QS 1a und 1b: Ableitung Architekturinstanz für Systemauslegung A bzw. B**
  Es soll ein neues Assistenzsystem zur energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebs entwickelt werden, für das kein Referenzsystem vorliegt. Die Referenz-

[198] Vgl. Kapitel 4.1.2 für die Erklärung der Optimierungsfunktionen

architektur soll das Szenario in der Form unterstützen, dass sich die erforderlichen funktionalen Bestandteile für das geforderte spezifische Systemverhalten effizient bestimmen und in Form einer konkreten Architekturinstanz abbilden lassen. Die Referenzarchitektur soll dabei so umfassend entworfen sein, dass die vorgehaltenen Modulkompetenzen und Schnittstellen bei der Instanziierung nicht erweitert werden müssen, was architektonischen Anpassungen gleichkäme (Ergänzung nicht vorhergesehener Module und Schnittstelle/Änderung der Modulkompetenzen). Architektonische Anpassungen bedeuten nämlich einen zusätzlich zu betreibenden Aufwand und begünstigen die Schaffung von Sonderlösungen, die sich bei späteren Änderungen der Systeme erneut aufwandssteigernd auswirken können.

Änderbarkeit

Die Qualitätsszenarien für das Qualitätsattribut Änderbarkeit basieren auf dem Entwicklungsszenario 2 (Änderungsentwicklung, vgl. Kapitel 3.1.2). Allgemein formuliert umfassen diese Änderungen in dem hier betrachteten Kontext die Übertragung eines Systems auf andere Umgebungsbedingungen, die Erweiterung um zusätzliche Funktionen, sowie die Änderung und Entfernung bestehender Funktionen. In diesem Zusammengang ist es wichtig zu verstehen, dass Änderungen bestehender Systemauslegungen sich stets auf die jeweilige instanziierte Architektur beziehen und nicht unmittelbar auf die Referenzarchitektur. Wie gut eine Architekturinstanz jedoch Änderbarkeit unterstützt, wird von der zugrundeliegende Referenzarchitektur vererbt.

Die Kurzbeschreibung der Qualitätsszenarien (QS) für das Qualitätsattribut Änderbarkeit lautet wie folgt:

- **QS 2a: Übertragung eines Assistenzsystems für einen konventionellen Antriebsstrang auf einen hybriden Antriebsstrang**
  Ein Assistenzsystem mit einem bestehenden Funktionsumfang, das in einem Fahrzeug mit einem konventionellen Antriebsstrang eingesetzt wird, soll auf einen hybriden Antriebstrang übertragen werden. Die Architektur soll dabei so auslegt sein, dass bestehende Funktionsmodule nach Möglichkeit unverändert bleiben. Sind Änderungen notwendig, sollen die betroffenen Module über definierte Schnittstellen einfach austauschbar sein. Sind neue Module erforderlich, sollen diese über bereits vorgesehene Schnittstellen integrierbar sein. Falls Änderungen notwendig sind, soll die Architektur eine schnelle und eindeutige Identifizierbarkeit von potentiellen Änderungsstellen unterstützen.
- **QS 2b: Übertragung eines Assistenzsystems auf eine Fahrzeug mit reduzierter Vorausschausensorik**
  Ein Assistenzsystem mit einem bestehenden Funktionsumfang, das mit einer definierten Vorausschausensorik betrieben wird, soll auf ein Fahrzeug mit im Ver-

gleich dazu reduzierter Vorausschausensorik übertragen werden. Die Anforderungen an die Architektur entsprechen QS 2a.

- **QS 3: Erweiterung eines bestehenden Sets an Optimierungsfunktionen um zusätzliche Optimierungsfunktionen**
  Ein Assistenzsystem mit einem bestehenden Funktionsumfang soll mit zusätzlichen Optimierungsfunktionen für den fernen Horizont (A) bzw. nahen/mittleren Horizont (B) erweitert werden. Die Architektur soll dabei die schnelle und eindeutige Identifizierbarkeit von potentiellen Änderungsstellen unterstützen. Des Weiteren soll sie so konzipiert sein, dass Optimierungsfunktionen für den fernen Horizont einfach an das Assistenzmodul und die Optimierungsfunktionen über vorgesehene Schnittstellen ankoppelbar sind. Für Optimierungsfunktionen im nahen/mittleren Horizont soll die Architektur zusätzlich eine möglichst lokal begrenzte (zentrale) Anpassung des Mechanismus zum Aufruf der geänderten Optimierungsfunktion ermöglichen.
- **QS 4: Funktionale Erweiterung einer bestehenden Optimierungsfunktion**
  Eine bestehende Optimierungsfunktion soll auf Grundlage eines identifizierten Verbesserungspotentials erweitert werden. Die Architektur soll dabei so auslegt sein, dass Änderungen an einer Optimierungsfunktion möglichst unabhängig (d.h. wechselwirkungsfrei) von den anderen Optimierungsfunktionen möglich sein sollen. Eine ggf. benötigte Anpassung des Mechanismus zum Aufruf der geänderten Optimierungsfunktion soll möglichst lokal begrenzt (zentral) durchführbar sein.
- **QS 5: Entfernen einer bestehenden Optimierungsfunktion**
  Eine bestehende Optimierungsfunktion soll auf Grundlage eines Löschungsbedarfes entfernt werden. Die Architektur soll dabei so auslegt sein, dass die Entfernung einer Optimierungsfunktion möglichst unabhängig (d.h. wechselwirkungsfrei) von den anderen Optimierungsfunktionen möglich sein sollen. Eine ggf. benötigte Anpassung des Mechanismus zum Aufruf der Optimierungsfunktion soll möglichst lokal begrenzt (zentral) durchführbar sein.

Die Soll-Ergebnisse, wie die auf der Referenzarchitektur basierenden Architekturinstanzen die Änderungsszenarien unterstützen sollen, können zusammengefasst werden:

- Stellen in der Architektur für benötigte Änderungen sollen innerhalb kurzer Zeit identifiziert werden können und klar erkennbar sein.
- Änderungen sollten ohne ein komplexes Verständnis des existierenden Gesamtsystems möglich sein.
- Bestehende Schnittstellen und Modulkompetenzen sollen möglichst erhalten bleiben, sodass der Änderungsaufwand möglichst gering gehalten werden kann (lokale bzw. nicht-lokale Änderungen, jedoch keine architektonischen Änderungen).

Testbarkeit

Das Qualitätsattribut Testbarkeit adressiert das Entwicklungsszenario 3, das beschreibt, dass ein Entwickler Systemfunktionen effizient testen möchte. Eine hinsichtlich Testbarkeit gute Architektur unterstützt zum einen eine funktionsorientiere Testfallerstellung[199] und anderen eine schnelle Lokalisierbarkeit von Fehlern.

- **QS6: Funktionsorientiertes Testen**
  Das Gesamtsystem bzw. Bestandteile daraus sollen einzelfunktionsorientiert testbar sein. Um eine effiziente Testfallgenerierung und Testdurchführung zu unterstützen, sollen die Systembestandteile möglichst voneinander unabhängig und inhaltlich kohärent sein (Anforderung nach loser Kopplung bzw. hoher Kohärenz). Dies erleichtert das testbedingte Herauslösen und Ansteuern einzelner Systembestandteile bzw. bei fehlerhaftem Systemverhalten eine schnelle Lokalisierung der betroffenen Bestandteile.

5.3 Architekturansätze

Der folgende Abschnitt beschreibt die den vorliegenden Architekturentwurf kennzeichnenden Architekturansätze. Diese stellen gleichzeitig die Hauptmerkmale dar, anhand derer diskutiert wird, in welchem Umfang die Architektur die einzelnen Qualitätsszenarien unterstützt.

Ebenenorientierung

Das Hauptmerkmal der Referenzarchitektur bildet ihre Strukturierung in unterschiedliche Ebenen. Die Aufteilung folgt dabei einen hybriden Ansatz, nach dem sich die Ebenen zum einen aus der Strukturierung der Hierarchie der Optimierungsfunktionen (Routenplanung, Manöverplanung, Trajektorienplanung Fahrweisen und Trajektorienplanung Betriebsweise) und zum anderen aus der Vorausschauweite bzw. dem Planungshorizont ableiten (vgl. Abbildung 5-2 Strukturierungsrahmen für Optimierungsfunktionen). Die trajektorienplanenden Optimierungsfunktionen für den nahen und mittleren Horizont werden der Verhaltensebene (unterste Ebene) zugeordnet, da sie das Verhalten des Fahrzeuges und der Komponenten festlegen. Durch das Konzept, in der Verhaltensebene den Betrieb vieler unterschiedliche Optimierungsfunktionen zuzulassen, die jeweils alle Zugriff auf die Umsetzungsschnittstelle besitzen, entsteht zusätzlicher Bedarf an einer

[199] Im Bereich der Softwareentwicklung beschreibt funktionsorientiertes Testen das Abprüfen, inwieweit ein Testobjekt (z. B Softwaremodul) in einem Testfall die vorgegebene Spezifikation erfüllt (vgl. Liggesmeyer, P. (2009): Software-Qualität, S. 50).

überlagerten und vorausschaubasierten Koordination dieser Optimierungsfunktionen. Diese Koordinationsaufgabe ist daher einer mittleren Ebene zugeordnet, die zusammen mit der manöverplanenden Optimierungsfunktion zur Fahrstreifenauswahl die Koordinationsebene bildet. Die Missionsebene enthält schließlich die Optimierungsfunktionen für den fernen Horizont, die sowohl routen- als auch trajektorienplanend (Fahrweisen- und SoC-Planung für den fernen Horizont) ausgelegt sein können.

Der Aspekt der Verortung von trajektorienplanenden Funktionen auch in der Missionsebene stellt einen Unterschied zu rein hierarchischen Ebenenansätzen dar, wie sie beispielsweise für Architekturen im Bereich der vollautomatisierten Fahrzeugzuführung z.B. bei Maurer[200] oder Hohm et al.[201] vorzufinden sind. Die Missionsebene der Referenzarchitektur ist nämlich nicht allein durch die Routenplanungsaufgabe definiert, sondern sie leitet sich aus der von ihr betrachteten Vorausschauweite ab. Folglich sind darin sämtliche Optimierungsunktionen verortet sind, die auf Informationen aus dem fernen Vorausschauhorizont zugreifen. Diese Architekturentscheidung stellt eine Abwandlung einer rein hierarchischen Ebenenstruktur und muss für einen Nutzer entsprechend kenntlich gemacht werden.

Gerichteter Informationsfluss

Die Referenzarchitektur orientiert sich auf der Betrachtungsebene des Gesamtsystems an dem Eingabe-Verarbeitung-Ausgabe-Prinzip (EVA-Prinzip). Durch die Nutzung dieses Prinzips wird ein gerichteter und unidirektionaler Informationsfluss begünstigt und Informationsrückflüsse bzw. Rückkopplungen reduziert. Dieser Ansatz unterstützt daher bei der Reduktion der Wechselwirkung zwischen Modulen und adressiert das Prinzip der losen Kopplung. Darüber hinaus bietet das EVA-Prinzip den Vorteil, dass es intuitiv verständlich ist und damit den Umgang mit der Referenzarchitektur erleichtert.

Der Ansatz kann jedoch nicht durchgängig verwendet werden, da funktional bedingt ein Informationsrückfluss in bestimmten Fällen vorgehalten werden muss. So werden beispielsweise zur Durchführung der Koordinationsaufgabe Informationen vom Fahrer bezüglich des gewünschten Assistenzkonzepts oder der Freigabe benötigt. Auch das Umfeldmodell ist auf Rückinformationen in Form der geplanten Route angewiesen, um daraus die elektronischen Horizonte bestimmten zu können.

---

[200] Maurer (2000): Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen, S. 41

[201] Hohm et al (2014): Automated Driving in Real Traffic

Nutzung von Abstraktionselementen

In der Referenzarchitektur stellen das Umfeldmodell und das Assistenzmodul Abstraktionselemente dar, um die energetische Optimierung von der Umfeldsensorik und der Umsetzung mittels MMS oder Regelung funktional zu entkoppeln und die Schnittstellen zu vereinheitlichen. Damit wird erreicht, dass die jeweiligen Bereiche unabhängig von der Struktur der benachbarten Bereiche werden.

Dieser Ansatz bietet den Nutzen, dass Änderungen an einem Element nicht zwangsläufig zu Anpassungen in den anderen Elementen führen müssen. So kann beispielsweise bei einem Wechsel der Vorausschausensorik die energetische Optimierung unverändert bleiben, wenn mittels Umfeldmodell sichergestellt wird, dass die benötigen Vorauschauinformationen weiterhin und unverändert bereitgestellt werden können. Ausgangseitig stellt das Assistenzmodul das Abstraktionselement dar, welches dafür sorgt, dass die Optimierungsfunktionen assistenzkonzeptunabhängig ausgelegt werden können. Änderungen am Assistenzkonzept führen somit nicht zwangsläufig zu Anpassungen an den Optimierungsfunktionen, genauso wie Änderungen an den Optimierungsfunkionen nicht automatisch Anpassungen des Assistenzkonzepts erfordern.

Verteilung von Entscheidungskompetenzen

Sobald eine Systemausprägung mehr als eine Optimierungsfunktion enthält, muss im Betrieb entschieden werden, welches Optimierungsergebnis für die Umsetzung dem Assistenzmodul bereitgestellt wird. Die Referenzarchitektur weist hierfür einen zweistufigen Entscheidungsprozess als Synthese der Vorteile einer reinen ebenenbasierten und nebenläufigen Architektur (vgl. Variantenauswahl in Kapitel 4.3.3) auf.

Der Kernaspekt ist die Verteilung der Entscheidungskompetenz auf die Optimierungsfunktionsplanung in der Koordinationsebene und die Arbitrierungsfunktionen in der Verhaltensebene. Dadurch kann eine klare fachliche Trennung zwischen vorausschaubasierter Entscheidung (welche der verfügbaren Optimierungsfunktionen eignet sich grundsätzlich für die vorausliegende Fahrsituation?) und ergebnisbasierter Entscheidung (welche der grundsätzlich geeigneten Optimierungsfunktionen liefert das optimale Ergebnis und soll durchgestellt werden?) erreicht werden.

Ebenenorientierte Mensch-Maschine-Kommunikation

Das fahrerseitige Assistenzmodul ist den drei Ebenen der energetischen Optimierung entsprechend modularisiert. Jedes Submodul ist dafür zuständig die in der jeweiligen Ebene erzeugten Optimierungsergebnisse an die MMS bereitzustellen bzw. die benötigten Fahrereingaben entgegenzunehmen. Daraus ergibt sich eine Modularisierung der

Fahrerinteraktion gemäß den in den jeweiligen Ebenen transportierten Inhalten (vgl. Beschreibung Assistenzmodul Kapitel 4.4.6).

5.4 Bewertung der Qualitätsmerkmale der Referenzarchitektur

5.4.1 Funktionalität

Die Anforderung nach Funktionalität beschreibt, dass sich für unterschiedliche Systemausprägungen, die in den betrachteten Anwendungsbereich fallen, Architekturinstanzen aus der Referenzarchitektur abbilden lassen sollen. Daraus lässt sich unmittelbar die Anforderung nach Unterstützung einer hohen Instanziierbarkeit ableiten, denn mit Instanziierbarkeit wird im Rahmen dieser Arbeit beschrieben, wie vollumfänglich und effizient sich Architekturinstanzen aus der Referenzarchitektur ableiten lassen. Um eine hohe Instanziierbarkeit zu erreichen, muss die Referenzarchitektur daher eine hohe *Anpassungsfähigkeit* unterstützen sowie eine hohe *Verständlichkeit* aufweisen. Beide Aspekte adressieren auch unmittelbar das in QS1a und 1b geforderte Sollergebnis. Eine verständliche und anpassungsfähige Referenzarchitektur unterstützt eine effiziente Bestimmung von erforderlichen funktionalen Bestandteile im Zuge einer Initialentwicklung sowie verhindert zu vermeidende architektonische Anpassungen.

Im Folgenden wird diskutiert, wie die verfolgten Architekturansätze die Anpassungsfähigkeit und Verständlichkeit unterstützen.

Architekturansätze zur Erhöhung der Anpassungsfähigkeit der Referenzarchitektur

Die Anpassungsfähigkeit der Referenzarchitektur wird durch die vorliegende Ausprägung der **Ebenenorientierung** unterstützt, da diese es erlaubt aufwandsminimal Architekturinstanzen für unterschiedliche Kombinationen von Optimierungsfunktionen zu abzuleiten.

Insbesondere das Konzept der Unterscheidung von Koordinationsebene und Verhaltensebene unterstützt die Anpassungsfähigkeit, indem es eine explizite Trennung zwischen Einsatzplanung und Ausführung der Optierungsfunktionen bereitstellt. Das bietet den Vorteil, dass die Optimierungsfunktionen in der Verhaltensebene nicht explizit aufeinander abgestimmt werden müssen, wie es in rein verhaltensbasierten Architekturen der Fall ist (vgl. Kapitel 4.2.2). Das hat nämlich zu Folge, dass für jede Kombination von Optimierungsfunktionen jeweils der Arbitrierungsmechanismus ggf. über das komplette Netzwerk an Optimierungsfunktionen angepasst werden muss, damit stets die situativ

angemessene und gleichzeitig energieoptimale Trajektorie ausgegeben wird. Im Falle der ebenenbasierten Architektur ist eine solche Abstimmung auf Verhaltensebene nicht notwendig, da der fahrsituationsgerechte Einsatz der Optimierungsfunktionen zentral durch die überlagerte Optimierungsfunktionsplanung koordiniert wird. Für die Instanziierung jeglicher Optimierungsfunktionen im nahen und mittleren Horizont bedeutet dies, dass neben der Trajektorienplanung nur noch die Aufrufbedingung bekannt sein muss, die dann in der Koordinationsebene hinterlegt wird. Eine explizite Abstimmung mit anderen Optimierungsfunktionen ist nicht erforderlich, was hinsichtlich Aufwandsminimierung und somit der universellen Anwendbarkeit als positiv bewertet werden kann.

Ein striktes Festhalten an einem **gerichteten Informationsfluss** gemäß dem EVA-Prinzip wirkt sich negativ auf die Anpassungsfähigkeit einer Referenzarchitektur aus, da Funktionen, die beispielsweise Informationen vom Fahrer benötigen, nicht darstellbar sind. Die vorliegende Referenzarchitektur sieht jedoch bedarfsgerecht bidirektionale Informationsflüsse vor, so dass Konzept des gerichteten Informationsflusses in der vorliegenden Form die Anpassbarkeit nicht beeinflusst.

Durch die Nutzung des Umfeldmodells und des Assistenzmoduls als **Abstraktionselemente** wird die Anpassbarkeit in der Form begünstigt, dass nicht für jede Systemausprägung individuelle Schnittstellen von der energetischen Optimierung zur Sensorik bzw. zur Umsetzung konzipiert und ausgehandelt werden müssen. Für die Anbindung der energetischen Optimierung kann auf einheitliche Schnittstellen zurückgegriffen werden, was sich im Rahmen einer Entwicklung aufwandsreduzierend auswirkt. Aus Nutzersicht führt die Entkopplung von energetischer Optimierung und Sensorik bzw. Umsetzung insbesondere dazu, dass die unterschiedlichen Bereiche (Umfeldwahrnehmung, energetische Optimierung, Umsetzung) unabhängig voneinander entwickelt werden können. Voraussetzung ist jedoch, dass Umfeldmodell bzw. Assistenzmodul dazu fähig sind, die notwendigen Übersetzungsaufgaben auszuführen.

Die **Verteilung von Entscheidungskompetenzen** begünstigt die Anpassungsfähigkeit, da dieser Ansatz eine zusätzliche Modularisierungsmöglichkeit einführt. Abhängig von der Systemauslegung kann bei der Architekturinstanziierung entschieden werden, ob eine vorausschaubasierte Optimierungsfunktionsplanung, eine ergebnisbasierte Arbitrierung oder beide Mechanismen verwendet werden. Dies wirkt sich positiv auf die Übersichtlichkeit aus, da nur der tatsächlich benötigte Entscheidungsmechanismus in der Architekturinstanz berücksichtigt wird.

Auch der Ansatz der **ebenenorientierten Mensch-Maschine-Kommunikation** führt zu einer erhöhten Modularisierung, was eine effiziente Architekturinstanziierung begünstigt. Werden Ebenen in der energetischen Optimierung nicht belegt, dann können die Inhalte der entsprechenden Ebene auch im Assistenzmodul ausgelassen werden.

Architekturansätze zur Erhöhung der Verständlichkeit der Referenzarchitektur

Ein hohes Maß an Verständlichkeit der Referenzarchitektur begünstigt, dass ein Nutzer schnell und eindeutig erkennen kann, welche Funktionsmodule in der Referenzarchitektur welche Aufgaben erfüllen und in welcher Wechselwirkung sie mit anderen Modulen stehen. Eine diesbezüglich ungenügende Referenzarchitektur kennzeichnet dabei aus, dass der Nutzer nicht eindeutig bestimmen kann, ob ein Modul in seiner Architekturinstanz notwendig ist oder nicht. Dieser Fall wird durch unklare bzw. verwaschene Modulkompetenzen, wenn es darum geht den Moduleinfluss auf eine Gesamtfunktion zu bestimmen, sowie durch eine starke Wechselwirkung zwischen den Modulen begünstigt. Eine gute Referenzarchitektur zeichnet sich Umkehrschluss daher dadurch aus, dass ihre Bestandeile eine hohe semantische Kohäsion und eine möglichst lose Kopplung zueinander haben. So erschließt sich für den Nutzer der Zweck und Zusammenhang eines Elementes schnell und eindeutig ohne zwangsläufig ein Verständnis für das Gesamtsystem zu benötigen.

Die vorliegende funktionale Referenzarchitektur unterstützt diese Aspekte mittels der Architekturansätze der **Ebenenorientierung** und des **gerichteten Informationsflusses**. Beide Ansätze helfen das System zu verstehen, indem sie die fachlichen Inhalte aus den einzelnen Architekturelementen in einen strukturierenden Ordnungsrahmen einbetten.

Sowohl die Nutzung von **Abstraktionselementen** als auch die **Verteilung von Entscheidungskompetenz** verringert zunächst das Verständnis der Referenzarchitektur, da beide Ansätze die Einführung zusätzlicher Module nach sich ziehen, deren Nutzen sich nicht intuitiv erschließt. Insbesondere die Unterscheidung zwischen den beiden Entscheidungsinstanzen bedarf einer Erklärung, um ihren Zweck zu begreifen. Umso wichtiger ist für eine Referenzarchitektur auch ihre Dokumentation, die entsprechende Ansätze erklärt.

Da sich die Strukturierung der **Mensch-Maschine-Kommunikation** von den Ebenen der Optimierung ableitet, erschließt sich die Begründung für ihre Struktur bei alleiniger Betrachtung zunächst einmal nicht zwangsläufig. Erst gemeinsam mit dem Wissen, wie die energetische Optimierung zusammengesetzt ist, lässt sich das nötige Verständnis um ihren Aufbau erklären. Dieses Wissen ist jedoch notwendig, um bei einer Instanziierung bewerten zu können, ob ein bestimmtes Submodul erforderlich ist oder nicht.

5.4.2 Änderbarkeit

In den Qualitätsszenarien zur Änderbarkeit wird gefordert, dass sich bei benötigten Änderungen die dafür relevanten Stellen im System eindeutig identifizieren lassen und

dass bestehende Schnittstellen und Modulkompetenzen möglichst erhalten bleiben sollen um den Änderungsaufwand gering zu halten.

Für die Erfüllung dieser Anforderungen setzt die Referenzarchitektur auf das *Prinzip des Entwurfs für Änderungen* (vgl. Kapitel 3.4.2), das besagt, dass vorhersehbare Änderungen mit in den Architekturentwurf einbezogen werden. Genau dieses Prinzip adressiert die Referenzarchitektur mit der Berücksichtigung aller Freiheitsgrade zur energetischen Beeinflussung des Fahrzeugbetriebs. Die Berücksichtigung unterstützt nämlich nicht nur ihre universelle Anwendbarkeit im Sinne einer initialen Architekturinstanziierung, sondern ermöglicht es auch, Änderungen eines bestehenden Systems aufwandsminimal darzustellen, da mögliche Änderungen bereits vorgehalten werden. Eine Änderung einer bestehenden Systemausprägung kann nämlich als eine Überführung einer bestehenden Architekturinstanz in eine andere Architekturinstanz, die sich auf die gleiche allgemeingültige Referenzarchitektur zurückführen lässt, verstanden werden.

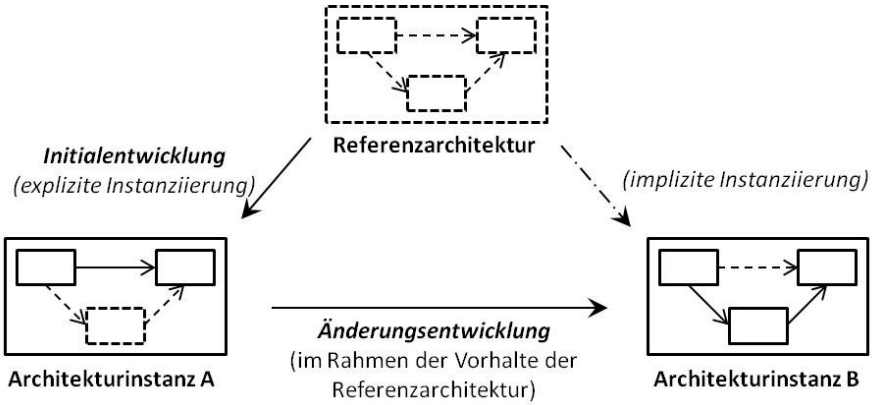

Abbildung 5-3: Referenzarchitektur bei Initial- und Änderungsentwicklung (schematisch)

Abbildung 5-3: zeigt den Sachverhalt schematisch. Während Architekturinstanz A eine explizite Architekturinstanz darstellt, die im Rahmen einer Initialentwicklung aus der Referenzarchitektur abgeleitet wurde, tritt Architekturinstanz B als eine implizite Architekturinstanz auf, da sie sich aus der Änderung der Architekturinstanz A ergibt. Die Änderung greift dabei auf vorgehaltene, jedoch in Architekturinstanz A nicht instanziierte Module und Schnittstellen zurück. Dabei gilt, dass solange geforderte Änderungen sich auf Grundlage der Vorhalte abbilden lassen, eine architektonische Anpassung vermieden werden kann. Erst Änderungen, die nicht vorhergesehen wurden bzw. Funktionen betreffen, die nicht dem Kontext der energetischen Optimierung entstammen, sollten zu architektonischen Anpassungen führen.

Für sämtliche Qualitätsszenarien des Qualitätsmerkmals Änderbarkeit kann daher anhand der Referenzarchitektur schrittweise identifiziert werden, in welchen Ebenen und Modulen Änderungen an dem bestehenden System notwendig sind. In diesem Sinne kann die Referenzarchitektur kann als eine Checkliste aufgefasst werden, anhand derer mögliche Änderungen systematisch identifiziert werden können.

Für das Qualitätsszenario der Übertragung eines bestehenden Systems von einem konventionellen auf einen hybriden Antriebsstrang (QS2a) kann eine exemplarische Abfrage daher wie folgt aufgebaut sein:

- **Sind Änderungen in der *Missionsebene* des Moduls *Energetischen Optimierung* notwendig?**
    - *Routenplanung*: Ja. Die bisherige Routenplanung ist hinsichtlich der Spezifika des hybriden Antriebstranges anzupassen. Da die hierzu notwendigen Fahrzeugparameter zentral im Energiewandlungsmodell verwaltet werden, ist auch in diesem Modul eine Anpassung notwendig. Beide Anpassungen entsprechen jeweils lokalen und nichtarchitektonischen Änderungen.
    - (Optimierungsfunktionen zur fernen Fahrweisen- und SoC-Planung sind im exemplarischen Ausgangssystem nicht vorhanden)
- **Sind Änderungen in der *Koordinationsebene* des Moduls *Energetischen Optimierung* notwendig?**
    - *Optimierungsfunktionsplanung*: Nein. Die Regel zum Aufruf der Optimierungsfunktionen bleibt gleich, da die Optimierungsfunktionen weiterhin in den gleichen Fahrsituationen aktiv sein sollen und mit den gleichen Vorausschauinformationen versorgt werden.
    - *Steuerung der Manöverausführung*: Nein. Die Optimierungsfunktionen bedienen weiterhin den gleichen Use Case hinsichtlich der Manöverausführung an nicht LZA-geregelten Haltepunkten, weshalb eine Anpassung nicht erforderlich ist.
    - *Handling des Assistenzkonzeptes*: Ja. Bei der Übertragung des bestehenden Systems auf einen hybriden Antriebsstrang wird zusätzlich ein Optimierungsmodul zur Betriebsmodusplanung benötigt. Da die Ergebnisse dieses Modul nur bei manueller Fahrzeugführung für die Fahrzeugregelung genutzt werden dürfen, stellt das Assistenzmodul das Ergebnis nur bei vorhandenem Triggersignal durch. Für die Erzeugung des Triggersignals ist die Subfunktion Handling des Assistenzkonzeptes zuständig, die entsprechend angepasst werden muss. Eine architektonische Anpassung ist dafür nicht notwendig, da entsprechende Module bzw. Modulkompetenzen und Schnittstellen in der Referenzarchitektur vorgehalten werden.
    - *Bereitstellung des Geschwindigkeitsanpassungsgrundes*: Nein. Betrachtetes Änderungsszenario betrifft diese Subfunktion nicht.
    - *Fahrstreifenauswahl*: Nein**.** Betrachtetes Änderungsszenario betrifft diese Subfunktion nicht.

- **Sind Änderungen in der *Verhaltensebene* des Moduls *Energetischen Optimierung* notwendig**?
  - Vorhandene *Optimierungsfunktionen zur integrierten Planung von Fahrweise und Betriebsmodus*: Ja. Durch den Wechsel auf den hybriden Antriebsstrang müssen die Optierungsfunktionen angepasst werden, da ein zusätzlicher innerer Freiheitsgrad hinzugekommen ist. Dies stellt eine lokale Anpassung innerhalb der jeweiligen Optimierungsfunktionen dar.
  - Durch die Übertragung auf den hybriden Antriebsstrang wird zusätzlich ein Optimierungsmodul zur Betriebsmodusplanung benötigt, das bei manueller Fahrzeugführung zum Einsatz kommt. Erfolgt die Fahrzeugführung hingegen automatisiert, werden die Ergebnisse der angepassten Optimierungsfunktionen zur integrierten Planung von Fahrweise und Betriebsmodus genutzt.
- **Sind Änderungen am *Umfeldmodell* notwendig?**
  - Ja. Je nach Ausprägung der neu hinzugefügten Betriebsmodusplanung werden zusätzliche Vorausschauinformationen im mittleren Horizont benötigt (Prädiktion des Geschwindigkeitsprofils sowie daraus abgleitet Prädiktion des Energieflusses am Rad unter Nutzung von Topographieinformation).
  - Die bestehenden Vorausschauhorizonte müssen nicht angepasst werden, wenn die von den Optimierungsfunktionen bedienten Use Cases identisch geblieben sind (z.B. Annäherung an LZA). Die innere Anpassung der Optimierungsfunktionen auf den hybriden Antriebsstrang wirkt sich nicht auf die Schnittstelle zwischen Umfeldmodul und energetischer Optimierung aus, da die Schnittstelle antriebsstrangunspezifisch ausgelegt ist.
- **Sind Änderungen am *Energiewandungsmodell* notwendig?**
  - Ja, da sich die technische Daten von Fahrzeug und Antriebsstrang und die Energiefluss- bzw. Verbrauchscharakteristik ändert.
- **Sind Änderungen am *Fahrermodell* notwendig?**
  - Nein. Betrachtetes Änderungsszenario wirkt sich nicht auf die Fahrerbeschreibung aus.
- **Sind Änderungen am *Assistenzmodul* notwendig?**
  - Für das fahrerseitige Assistenzmodul sind keine Anpassungen notwendig, da keine neuen Use Cases und Assistenzansätze hinzugekommen sind.
  - Für das automatisierungsseitige Assistenzmodul ist eine Anpassung notwendig, da es eine von extern getriggerte Umschaltung zwischen den Ergebnissen der integrierten Planung für Fahrweise und Betriebsmodi und der Betriebsmodusplanung darstellen muss.

Die hier betrachtete Änderung in Form einer Übertragung eines bestehenden Assistenzsystems auf einen hybriden Antriebsstrang resultiert in mehreren Anpassungsbedarfen verteilt auf unterschiedliche Module und Ebenen. Vor diesem Hintergrund wird die Gesamtänderung zwar als nichtlokal betrachtet, die einzelnen Anpassungen sind jedoch lokal begrenzt und systematisch identifizierbar. Eine architektonische Anpassung ist zur Durchführung der geforderten Änderung nicht notwendig.

Auch für die anderen Qualitätsszenarien lässt sich dieses Vorgehen zur Identifikation der Anpassungen anwenden. Je nach benötigter Änderung (Erweiterung um weitere Funktionen, Erweiterung einer bestehenden Funktion, Entfernung einer Funktion) und zugrundeliegendem Ausgangssystem sehen die erforderlichen Anpassungen in einzelnen Ebenen und Modulen jedoch anders aus.

Neben dem Ansatz, die Änderbarkeit durch die vorausschauende Berücksichtigung unterschiedlicher Optimierungsfunktionen für verschiedene Freiheitsgrade zu begünstigen (Prinzip des Entwurfs für Änderungen), unterstützen auch die anderen Architekturansätze die Änderbarkeit. Diese kommen insbesondere auch dann zum Tragen, wenn geforderte Änderungen sich nicht mit den funktionalen Vorhalten abbilden lassen und architektonische Anpassungen nach sich ziehen.

Die **Ebenenorientierung** mit der hierarchischen Strukturierung der Optimierungsfunktionen in Kombination mit dem EVA-Prinzip (**gerichteter Informationsfluss**) unterstützt die Änderbarkeit dahingehend, dass alle Informationsbereitstellungs-. Optimierungs- und Koordinations-. sowie Umsetzungsfunktionen eine eindeutige Verortung haben. Dies unterstützt (neben dem Checklistenansatz) eine effiziente Identifikation von Stellen für benötigte Anpassungen. Auch die Nutzung der **Abstraktionselemente** Umfeldmodell und Assistenzmodul unterstützt die Änderbarkeit, da Änderungen an den Bereichen Umfeldwahrnehmung, energetische Optimierung und Umsetzung voneinander entkoppelt werden können. Änderungen in einem Bereich ziehen somit nicht zwangsläufig Änderungen im anderen Bereich nach sich.

Die **Verteilung der Entscheidungskompetenz** und die **ebenenorientierten Mensch-Maschine-Kommunikation** erhöhen die Modularität eines Systems, was sich in einer Reduktion der Modulgröße, einer Erhöhung der semantischen Kohäsion und eine Reduktion der Kopplung zwischen Modulen niederschlägt. Diese Entwurfstaktiken erhöhen die Änderbarkeit (vgl. Kapitel 3.4.2) und tragen somit zu einer Reduktion des Änderungsaufwandes bei.

5.4.3 Testbarkeit

Eine Referenzarchitektur mit einer hohen Testbarkeit erleichtert das testbedingte Herauslösen und Ansteuern einzelner Systembestandteile bzw. bei fehlerhaftem Systemverhalten eine schnelle Lokalisierung der betroffenen Bestandteile. Erreicht werden

kann dies durch eine Reduktion der strukturellen Komplexität, indem jedem Modul eine möglichst fokussierte Aufgabe zugewiesen wird und die Wechselwirkungen bzw. Abhängigkeiten zwischen den Modulen beschränkt werden (vgl. Kapitel 3.4.2). Insbesondere ebenenbasierte Architekturen unterstützen die Testbarkeit, da dort zunächst die unteren Schichten getestet werden können und dann darauf aufbauend die oberen Schichten.

Vor diesem Hintergrund unterstützt die **Ebenenorientierung** der vorliegenden Referenzarchitektur die Testbarkeit, da zunächst die Verhaltensebene unabhängig von den überlagerten Ebenen getestet werden kann. Da zwischen den einzelnen Optimierungsfunktionen keine Abhängigkeiten bestehen, können diese sogar einzeln getestet werden. Einschränkend muss jedoch erwähnt werden, dass in der Verhaltensebene die Trajektorien der fernen Fahrweisen und SoC-Planung aus der Missionsebene berücksichtigt werden müssen, sofern diese Optimierungsfunktionen laut Systemauslegung vorgesehen sind.

Zum Testen der Koordinationsebene ist die Verhaltensebene teilweise erforderlich. Während die Optimierungsfunktionsplanung und die sonstigen Koordinationsfunktionen ohne die Verhaltensebene getestet werden können, benötigt das Modul zur Fahrstreifenauswahl die Information „energieminimaler Fahrstreifen“ aus der Arbitrierung der Verhaltensebene. Die Missionsebene hingegen ist wieder komplett unabhängig testbar, da die darin enthaltenen Optimierungsfunktionen keine Informationen aus den unterlagerten Ebenen benötigen.

Ein **gerichteter Informationsfluss** begünstigt ebenfalls grundsätzlich die Testbarkeit, da die funktionale Wirkkette schrittweise und aufeinander aufbauend von der Informationsbereitstellung, über die Informationsverarbeitung hin zur Informationsausgabe getestet werden kann. Für die vorliegende Referenzarchitektur gilt das jedoch nur eingeschränkt, da Informationsrückflüsse (Routenplanung, Fahrerinteraktion) vorhanden sind. Daher ist ein rein informationsflussorientiertes Testen lediglich in der Verhaltensebene möglich.

Die Nutzung der **Abstraktionselemente** Umfeldmodell und Assistenzmodul begünstigt eine effiziente Testauslegung, da die zu testenden Funktionsmodule über definierte Schnittstellen angesteuert werden können. So ist es beispielsweise möglich, die energetische Optimierung zu testen ohne konkrete Sensorsignale simulieren zu müssen. Es reicht aus die abstrakte Schnittstelle des Umfeldmodells zu bedienen.

Da die **Verteilung der Entscheidungskompetenz** eine Modularisierung darstellt, begünstigt sie im Fehlerfall eine gezielte Lokalsierung der fehlerhaften Entscheidungsinstanz. Wird beispielsweise eine nicht situationsgerechte Trajektorie bereitgestellt und die Trajektorienplaner selbst sind fehlerfrei, liegt vermutlich ein Fehler in der Optimierungsplanung und nicht in der Arbitrierung vor.

5.5 Diskussion der Ergebnisse

Im Rahmen dieses Abschnittes werden die Ergebnisse der Architekturbewertung den Anforderungen aus der Anforderungsanalyse in Kapitel 3 gegenübergestellt und diskutiert. Ziel der Diskussion ist darzulegen, inwieweit die vorliegende Referenzarchitektur die gestellten Anforderungen erfüllt. Der Erfüllungsgrad der funktionalen Anforderungen gibt dabei Aufschluss, mit welchen Einschränkungen die Referenzarchitektur den geforderten Anwendungsbereich abdeckt. Hinsichtlich der nichtfunktionalen Anforderungen wird zusammengefasst, welche verfolgten Prinzipien deren Erfüllung begünstigen. Mit der Diskussion wird dann auch auf die zentralen Fragenstellungen dieser Arbeit, wie sie in Kapitel 1.3 formuliert sind, eingegangen.

5.5.1 Umsetzung der funktionalen Anforderungen

Mit dem vorliegenden Entwurf der funktionalen Referenzarchitektur werden sämtliche funktionalen Anforderungen FA 1 bis FA 5 behandelt. Für die Erfüllung der FA 1.1 bis 1.11 werden hierfür in der Architektur explizite Optimierungsfunktionen vorgesehen, die eine Einzelumsetzung der Anforderung ermöglichen. Zu diskutieren sind jedoch die FA 1.4 (Fahrstreifenplanung), FA 1.8 (Bestimmung einer energieoptimierten Betriebsstrategie für thermische Nebenfunktionen) und 1.9. (Bestimmung einer Getriebeschaltstrategie zur energetischen Arbeitspunktoptimierung).

Mit der FA 1.4 ist eine strategische Fahrstreifenplanung gefordert, die als Ergebnis eine Fahrstreifenwechselempfehlung ausgibt, wenn sich das Ego-Fahrzeug nicht auf dem energieminimalen Fahrstreifen befindet. Die Information zum energieminimalen Fahrstreifen kann dabei entweder auf Grundlage von Vorausschauinformationen innerhalb der *Fahrstreifenauswahl* geschätzt werden oder sie wird aus Optimierungsergebnissen in der unterlagerten Verhaltensebene generiert und an die Koordinationsebene hochgemeldet (vgl. Energetische Optimierung Kap. 4.4.2). Die erste Möglichkeit erlaubt es für die Erfüllung der FA 1.4 auf die Nutzung von Optimierungsfunktionen in der Verhaltensebene zu verzichten, was Vorteile hinsichtlich einer schlanken Systemauslegung bringt. Allerdings hängt die Bestimmung des energieminimalen Fahrstreifens dann von einer vorausschaubasierten Abschätzung ab, die ungenau oder falsch sein kann. Der ergebnisbasierte Ansatz ist diesbezüglich im Vorteil, da der energieminimale Fahrstreifen basierend auf Optierungsergebnissen bestimmt wird. Jedoch sind für die Erfüllung der FA 1.4 dann mehrere Module erforderlich.

Die Bestimmung energieoptimierter Betriebsstrategien für thermische Nebenfunktionen (FA 1.8) ist im vorliegenden Architekturentwurf Bestandteil der Optimierungsfunktion *Betriebsmodusplanung*, da sie als integrierter Bestandteil einer Hybridbetriebsstrategie betrachtet wird. Erst durch die gemeinsame Optimierung mit den sonstigen inneren

Freiheitsgraden (Leistungsverteilung, Triebstrangzustand) kann das volle Optimierungspotential gehoben werden. Eine Einzelumsetzung der FA 1.8 durch eine explizite Optimierungsfunktion ist daher nicht vorgesehen.

Auch für die Erfüllung der FA 1.9 (Bestimmung einer Getriebeschaltstrategie zur energetischen Arbeitspunktoptimierung) wird keine explizite Optimierungsfunktion in der Referenzarchitektur vorgesehen, da die Getriebeschaltstrategie keinen Freiheitsgrad darstellt, über den mittels vorausschauender Planung der Energiebedarf für eine Transportaufgabe maßgeblich gesenkt werden kann. Stattdessen wird gefordert, dass die Getriebeübersetzung stets zu einer geforderten Leistung den energieminimalen Arbeitspunkt der Antriebsmaschine ermöglicht. Für diese Aufgabe ist keine Streckenvorausschau erforderlich. Wird als Optimierungskriterium jedoch gefordert, dass mittels Getriebeschaltstrategie z.B. die Fahrbarkeit erhöht werden soll, so kann eine Nutzung von Vorausschauinformationen gewinnbringend sein. Wird beispielsweise mittels Vorausschau erkannt, dass unmittelbar eine Überholsituation bevorsteht, kann das Getriebe den Wechsel in höhere (und damit energieeffizientere) Gangstufen temporär unterbinden. Derartige vorausschaubasierten Funktionen werden hier jedoch nicht betrachtet. Im Zuge der energetischen Optimierung des Fahrbetriebs wird die Getriebeschaltstrategie jedoch in der integrierten Planung der Fahrweise und Betriebsmodi als Steuergrößenverlauf mitbestimmt, um gezielt unterschiedliche Antriebsstrangzustände (z.B. Schub-, Freilauf- oder Segelbetrieb) darstellen zu können.

Mit der funktionalen Anforderung nach einer Skalierbarkeit des Funktionsumfanges (FA 2) wird gefordert, dass sich aus der Referenzarchitektur Systeme mit unterschiedlichen Optimierungsumfängen ableiten lassen sollen. Erfüllt wird diese Anforderung durch die Ebenenorientierung und die Verteilung der Entscheidungskompetenz. Diese Ansätze erlauben, den Funktionsumfang variabel zu skalieren, indem die Optimierungsfunktionen in der Verhaltensebene verortet werden und ihre Koordination zentral über die vorausschaubasierte Optimierungsfunktionsplanung und die ergebnisbasierte Arbitrierung durchgeführt wird[202]. Dieser Ansatz zur Skalierung ist in der Anzahl an Optimierungsfunktionen her grundsätzlich nicht beschränkt, jedoch muss mit jeder zusätzlichen Optimierungsfunktion in der Verhaltensebene der Auswahlmechanismus in der Optimierungsfunktionsplanung erweitert werden. Zusätzlich wird für die ergebnisbasierte Arbitrierung gefordert, dass die Ergebnisse der Optimierungsfunktionen vergleichbar sind, um das kostengünstigste Ergebnis zwecks Umsetzung durchstellen zu können. Hierfür müssen die Optimierungsfunktionen neben den eigentlichen Trajektorien für Fahrweise und Betriebsmodi auch kostenbezogene Kenngrößen bereitstellen.

Die funktionale Anforderung nach einer Vorausschau, die modular hinsichtlich der Bereitstellung von Vorausschauinformationen ist (FA 3), wird in der funktionalen Refe-

[202] Vgl. Qualitätsmerkmal Funktionalität bzw. dessen Teilmerkmal Anpassbarkeit, Kap. 5.4.1

renzarchitektur durch die Nutzung des Umfeldmodells adressiert. Das Umfeldmodell stellt eine Abstraktionsschicht dar, die Funktionen in der energetischen Optimierung von den Daten der On-Board-Sensorik, digitalen Karten und Verkehrstelematik entkoppelt und diese stattdessen über einheitliche Schnittstellen bereitstellt. Gemäß vorliegender Referenzarchitektur beinhaltet das Umfeldmodell auch die Funktionen zur Umfeldprädiktion und zur Situationsbewertung und setzt damit die FA 4 um. Diese Funktionen sind deshalb im Umfeldmodell verortet, da durch sie ermittelt wird, welche Relationen die Verkehrsmittel untereinander bzw. zur Verkehrsinfrastruktur haben (z.B. Fahrstreifenwechselwahrscheinlichkeit). Die Relationen des Egofahrzeuges zu anderen Entitäten (z.B. Auswahl eines Zielfahrzeuges für die Längsführung) werden hingegen nicht im Umfeldmodell betrachtet. Falls entsprechende, optimierungsfunktionsspezifische Informationen notwendig sind, werden sie in Vorverarbeitungsschritten der jeweiligen Optimierungsfunktionen bestimmt.

Die funktionale Referenzarchitektur unterstützt die Umsetzung von Optimierungsergebnissen sowohl mittels empfehlender als auch ausführender Assistenzkonzepte (FA 5). Der Architekturentwurf berücksichtigt ebenfalls die Anforderung, dass in einer Systemausprägung beide Assistenzkonzepte zur Verfügung stehen sollen, sodass sowohl die manuelle als auch die automatisierte Fahrzeugführung energetisch optimiert werden können. Umgesetzt wird diese Anforderung durch das Konzept des Assistenzmoduls und die Funktion zum Handling des Assistenzkonzeptes auf der Koordinationsebene.

Der vorliegende Entwurf der funktionalen Referenzarchitektur behandelt sämtliche funktionalen Anforderungen FA 1 bis FA 5. Für die Erfüllung jeder dieser Anforderungen kann auf realisierende architektonischen Ansätze bzw. Architekturelemente verwiesen werden. Alle funktionalen Anforderungen werden in dem vorliegenden Architekturentwurf betrachtet.

5.5.2 Umsetzung der nichtfunktionalen Anforderungen

Die **Funktionalität** der Referenzarchitektur wird primär durch das Prinzip der vorausschauenden Berücksichtigung unterschiedlicher Optimierungsfunktionen zur Beeinflussung des Fahrzeugbetriebs adressiert. Sämtliche Klassen an Optimierungsfunktionen (Routenplanung, Manöverplanung, Trajektorienplanung Fahrweise bzw. Betriebsmodi) werden a-priori bestimmt, in den unterschiedlichen Ebenen der Referenzarchitektur verortet und mit Planungs- bzw. Entscheidungsfunktionen ergänzt. Die Referenzarchitektur stellt somit eine funktionale Maximalausprägung dar, aus der die jeweiligen Systemausprägungen durch Instanziierung abgeleitet werden. Eine nachträgliche Ergänzung um zusätzliche Optimierungsfunktionen, d.h. eine Erweiterung des Anwendungsbereichs der Referenzarchitektur ist nicht explizit vorgesehen, da mit dem bestehenden Umfang an Optimierungsfunktionen bereits alle identifizierten Freiheitsgrade zur energetischen Optimierung der Fahrzeugbetriebs adressiert werden.

Die verwendeten Architekturansätze (Ebenenorientierung, etc.) unterstützten die Funktionalität hingegen sekundär, indem sie zu einer Modularisierung und losen Kopplung beitragen und so zu einer hohen Anpassungsfähigkeit bei der Instanziierung führen. Das bedeutet, dass während der erste Aspekt (vorausschauende Berücksichtigung unterschiedlicher Optimierungsfunktionen) den Nutzungsbereich der Referenzarchitektur definiert (das „WAS“), die anderen Architekturansätze hingegen die Nutzungsweise beeinflussen (das „WIE“). Beide Aspekte sind für eine hohe Funktionalität relevant, denn eine Referenzarchitektur, die zwar für einen breiten Nutzungsbereich ausgelegt ist, sich jedoch nur umständlich für die jeweilige Entwicklungsaufgabe anpassen lässt, erhöht den zu betreibenden Entwicklungsaufwand.

Die Funktionalität hängt dabei auch von der Verständlichkeit der Architektur ab. Eine Referenzarchitektur, die nur schwer verständlich ist, erzeugt Kosten bedingt durch einen erhöhten Einarbeitungsaufwand. Eine Einschätzung der Verständlichkeit ist jedoch subjektiv geprägt, da sie von der Erfahrung des Nutzers abhängt. Eine allgemeingültige Bewertung der Verständlichkeit ist daher nicht möglich. Dennoch wird mit geeigneten Architekturansätzen, wie der Ebenenorientierung und dem gerichteten Informationsfluss die Erhöhung der Verständlichkeit unterstützt.

Wie für die Funktionalität spielt auch für die **Änderbarkeit** das Prinzip der vorausschauenden Berücksichtigung verschiedener Optimierungsfunktionen für sämtliche Freiheitsgrade der Fahrzeugführung die zentrale Rolle. Durch diesen Ansatz werden Funktionen und Schnittstellen vorgehalten, um so nach Möglichkeit eine hohe Anzahl an nichtarchitektonischen Änderungen zu ermöglichen.

Die **Testbarkeit** der Referenzarchitektur wird hingegen durch die verwendeten Architekturansätze und nicht durch die vorausschauende Berücksichtigung der verschiedenen Optimierungsfunktionen erhöht. Die Testbarkeit hängt nämlich primär davon ab, wie die vorhandenen Architekturelemente strukturiert sind und nicht davon, welche Architekturelemente berücksichtigt wurden.

5.5.3 Diskussion der zentralen Fragestellungen

Die zentralen Fragestellungen, die im Rahmen dieser Arbeit beantwortet werden sollen, gehen über die Erfüllung der funktionalen und nichtfunktionalen Anforderungen hinaus. Diese Fragestellungen werden im Folgenden diskutiert.

Kann die funktionale Referenzarchitektur so gestaltet werden, dass Modifikationen in Form von Erweiterungen und Übertragungen als lokale oder nichtlokale Änderungen[203] dargestellt werden können oder gibt es Modifikationen, die eine architektonische Anpassung erfordern?

Die funktionale Referenzarchitektur berücksichtigt sämtliche energetisch relevanten Freiheitsgrade der Fahrzeugführung, die im verfolgten Top-Down-basierten Entwicklungsprozess identifiziert wurden. Jede Optimierungsfunktion, die einen der identifizierten Freiheitsgrade behandelt, ist ein der Referenzarchitektur vorgesehen. Damit orientiert sich die Referenzarchitektur an dem Prinzip des Entwurfs für Änderungen, das zukünftige Modifikationen bereits mit einbezieht. Für die Beantwortung der Forschungsfrage bedeutet dies, dass Modifikationen, die die a-priori berücksichtigten Freiheitsgrade adressieren, sich auf lokale Änderungen begrenzen. Diese Aussage gilt jedoch nur solange, wie sich die geforderten Modifikationen auf Grundlage der funktionalen Grundstruktur bestehend aus Informationsbereitstellung (Umfeldmodell), Informationsverarbeitung (energetische Optimierung) und Informationsausgabe (Assistenzmodul) darstellen lassen. Wird durch eine Modifikation beispielsweise ein direkter Zugriff auf die Umfeldsensorik oder Aktorik benötigt, stellt dies eine architektonische Anpassung dar, da dieser Informationsfluss nicht vorgehalten wird. Für die Beantwortung der Forschungsfrage spielt auch die Detaillierungstiefe der Referenzarchitektur eine Rolle. So beschreibt die Referenzarchitektur keine funktionalen Details innerhalb der einzelnen Funktionsmodule wie beispielsweise der Optimierungsfunktionen. In dieser Detaillierungsebene können geforderte Modifikationen durchaus zu architektonischen Anpassungen führen, wenngleich diese die Gesamtarchitektur nicht beeinflussen.

Bis zu welchem Konkretisierungsgrad kann die funktionale Referenzarchitektur einheitlich beschrieben bzw. ab welchem Konkretisierungsgrad ist die Bildung von anwendungsspezifischen Instanzen erforderlich?

Eine einheitliche Beschreibung der funktionalen Referenzarchitektur endet auf der Gesamtsystemebene mit dem Konkretisierungsgrad der vorliegenden Modulbeschreibung (vgl. Kapitel 4.4). Eine detailliertere einheitliche Beschreibung der Optimierungsfunktionen ist nicht mehr möglich, da jede weitere Detaillierung dann bereits ein konkretes Optimierungsproblem und dessen Lösung aufgreift. Folglich enthält die innere Architektur der Optimierungsfunktionen dann bereits die Subelemente, die zur Lösung dieses konkreten Optimierungsproblems erforderlich sind. Dies kann beispielsweise eine optimierungsspezifische Aufbereitung von Vorausschaudaten (z.B. zur Bildung eines Fahrschlauches) oder zu Situationsbewertung (z.B. Zielfahrzeugauswahl) umfassen.

[203] vgl. Modifizierbarkeit, S. 8

Kann der Anspruch der Architektur, im betrachteten Nutzungskontext universell anwendbar zu sein, validiert werden?

Die universelle Anwendbarkeit der Referenzarchitektur soll sich in dem Nutzen äußern, dass sie dabei hilft, spezifische Systemausprägungen effizient planen und realisieren zu können und dabei unterstützt, Änderungen von bestehenden Systemen im Nachhinein kosten- und zeiteffizient durchzuführen zu können (vgl. Kap. 1.2.3). Zur Validierung dieser Aspekte ist eine Evaluierung der entwickelten Referenzarchitektur notwendig, die explizit untersucht, ob der Anwendernutzen beim Umgang mit der Referenzarchitektur tatsächlich bereitgestellt wird. Eine derartige Evaluierung ist nicht Bestandteil dieser Arbeit, weshalb die Fragestellung zur Validität der universellen Anwendbarkeit der Referenzarchitektur nicht beantwortet werden kann. In den Entwurf der Referenzarchitektur sind jedoch Architekturprinzipien und -ansätze eingeflossen, die eine hohe Funktionalität, Änderbarkeit und Testbarkeit grundsätzlich unterstützen und somit gezielt die universelle Anwendbarkeit adressieren.

Steht die Nutzung einer funktionale Referenzarchitektur für Assistenzsysteme zur energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebs in Widerspruch zu anderen, im Automobilbereich relevanten Referenzarchitekturen[204]?

Die vorliegende funktionale Referenzarchitektur adressiert im Kern die Frage, mit welcher funktionalen Struktur die verfügbaren Freiheitsgrade zur energetischen Beeinflussung des Fahrzeugbetriebs möglichst vollständig, nachvollziehbar und modular ansprechbar gemacht werden können. Sie gibt einen Aufschluss darüber, wie ein System ausschauen kann, das bestimmt, welche Optimierungsfunktionen auf unterschiedlichen Ebenen des Fahrzeugbetriebs situationsgerecht betrieben werden müssen, um ein Fahrtziel energieeffizient zu erreichen. Referenzarchitekturen für das hochautomatisierte bzw. autonome Fahren hingegen beschreiben, wie ein System ausschauen kann, das bestimmt, welche Fahrmanöver (Verhalten) möglich bzw. notwendig sind, und wie sie ausgeführt werden müssen, um ein Fahrtziel zu erreichen. Für diese Aufgabe ist eine Manöver- bzw. Ausführungsplanung erforderlich, die festlegt, welche Manöver mit welchen Randbedingungen durchgeführt werden müssen, um einer Route zu folgen. Im Gegensatz dazu unterscheidet sich der Bereich der Ausführungsplanung in der vorliegenden Referenzarchitektur funktional, da hier keine umfassende Manöverplanung durchgeführt wird. Stattdessen findet hier eine Einsatzplanung der unterschiedlichen Trajektorienplaner statt, die die Längsführungsführungskomponente für das Manöver des Fahrstreifenfolgens bestimmen. Zwar betrachtet die vorliegende Referenzarchitektur auch den Fahrstreifenwechsel, jedoch erfolgt keine ausführliche Ausführungsplanung, sondern lediglich die Bestimmung einer Ausführungsempfehlung aus energetischer Hinsicht. Die Ausführungsplanung, insbesondere hinsichtlich einer sicheren Ausführ-

[204] Hier sind in erster Linie Architekturen für hochautomatisiertes Fahren relevant

barkeit eines Manövers, muss vom Fahrer selbst übernehmen werden. Systeme zur automatisierten Längsführung übernehmen diese Aufgabe komplett vom Fahrer und führen einen Fahrstreifenwechsel selbstständig durch.

Die Beantwortung der Frage, ob die Nutzung der vorliegenden funktionalen Referenzarchitektur in einem Widerspruch zu funktionalen Architekturen der hochautomatisierten Fahrzeugführung steht, hängt stets von der jeweils betrachtenden Ausprägung der funktionalen Architektur einer hochautomatisierten Fahrzeugführung ab. Sieht die Architektur vor, die Längsführungstrajektorie separiert von der Querführung zu bestimmen, so können die fahrweisenbeeinflussenden Optimierungsfunktionen für die Bestimmung der Längsführung genutzt werden. Da die fahrweisenbeeinflussenden Optimierungsfunktionen jedoch als Komfortfunktionen ausgelegt sind und stets der Fahrer die Verantwortung für Fahrzeugführung zu tragen hat, werden bei einem Einsatz in automatisierten Fahrzeugen zusätzliche kollisionsvermeidende (KV) Funktionen benötigt. Tritt eine kritische Situation, für die die Optimierungsfunktionen nicht ausgelegt sind (z.B. plötzlich querender Verkehrsteilnehmer), müssen entsprechende KV-Funktionen entschärfend eingreifen und die Optimierungsfunktionen überstimmen. Sieht hingegen das Konzept zur hochautomatisierten Fahrzeugführung eine integrierte Trajektorienplanung für die Längs- und Querführung vor, die gleichzeitig kollisionsvermeidend agieren soll, dann können die fahrweisenbeeinflussenden Optimierungsfunktionen in der vorliegenden Form nicht genutzt werden.

Die Optimierungsfunktionen zur vorausschauenden Betriebsmodusplanung für hybride Antriebsstränge hingegen sind mit allen Architekturen kompatibel, die Soll-Größen für die Längsführung als Ergebnis bereitstellen. Auch die Planung energieeffizienter Routen steht in keinem Widerspruch zu einer hochautomatisierten Fahrzeugführung, wenn die entsprechende Architektur die Routenplanung als Tätigkeit in ihrer Kontrollhierarchie vorsieht.

6 Gesamtfazit und Ausblick

Die Zielsetzung dieser Arbeit setzt sich zusammen aus der Entwicklung einer funktionalen Referenzarchitektur für den Anwendungsbereich der Assistenzsysteme zur energetischen Optimierung des Betriebs von Fahrzeugen und der expliziten Aufzeigung des Erkenntnisweges, der zur letztendlichen Zielarchitektur geführt hat. Der Anspruch, den die Architektur dabei erhebt, ist eine universelle Anwendbarkeit, was durch ein hohes Maß an Funktionalität und die explizite Unterstützung von Modifizierbarkeit zum Ausdruck kommt.

Die universelle Anwendbarkeit stellt auch gleichzeitig die zentrale Herausforderung bei der Entwicklung der Referenzarchitektur dar. Während anwendungsfallbezogene Systemarchitekturen für gewöhnlich für Systeme mit einem bekannten Funktionsumfang entworfen werden, repräsentieren Referenzarchitekturen architektonische Gesamtlösungen für einen bestimmten Problembereich. Erst in einer konkreten Anwendung werden Referenzarchitekturen in anwendungsspezifische Architekturen überführt. Eine Referenzarchitektur, die sich durch ein hohes Maß an Funktionalität auszeichnet, muss daher alle notwendigen Funktionselemente eines betrachteten Anwendungsbereichs berücksichtigen, um eine breite Anwendbarkeit sicherzustellen. Die Bestimmung bzw. Abgrenzung des Anwendungsbereiches stellt daher eine entscheidende Aufgabe dar, da über den Anwendungsbereich maßgeblich die zu berücksichtigten Funktionen definiert werden. Der Anwendungsbereich beeinflusst gleichzeitig auch die Modifizierbarkeit eines Systems. Je umfangreicher der Anwendungsbereich gefasst wurde, d.h. je mehr Funktionen a-priori berücksichtig wurden, desto unwahrscheinlicher resultiert aus der Anpassung eines auf der Referenzarchitektur basierenden Systems eine architektonische Änderung. Architektonische Änderungen sind nämlich dann erforderlich, wenn für geforderte Anpassungen bisher nicht berücksichtigte Funktionsmodule und Schnittstellen in einer bestehenden Struktur ergänzt werden müssen.

Der im Rahmen dieser Arbeit betrachtete Anwendungsbereich lässt sich zusammenfassen auf Assistenzsysteme, die die Freiheitsgrade bedienen, mit denen sich der Fahrzeugbetrieb energetisch beeinflussen lässt. Die Freiheitsgrade lassen sich dabei in äußere und innere Freiheitsgrade unterscheiden, wobei mittels äußerer Freiheitsgrade der Nutzenergiebedarf und mittels innerer Freiheitsgrade die Nutzenergiebereitstellung beeinflusst werden können. Der Kernaspekt der energetischen Optimierung besteht darin, mittels Vorausschau die Freiheitsgrade so zu steuern, dass die Fahraufgabe kostenminimal absolviert werden kann. Aus diesem Ansatz heraus werden Funktionen für die Planung von optimalen Routen sowie zur Bestimmung optimaler Fahrweisen und Betriebsweisen bzw. Betriebsstrategien identifiziert und in einem ebenenbasierten An-

satz positioniert. Die Herausforderung beim Entwurf der Architektur dieser Optimierungsfunktionen stellt dabei die Koordination bzw. Arbitierung der einzelnen Optimierungsfunktionen dar. Dadurch, dass der Architekturansatz die Nutzung mehrerer fahr- bzw. betriebsweisenbeeinflussender Optimierungsfunktionen zulässt, bedarf es eines Mechanismus, der die Aufrufe bzw. Ergebnisbereitstellung steuert. Realisiert wird diese Anforderung durch einen hybriden Ansatz, der aus einer vorausschaubasierten Einsatzplanung in der höheren Missionsebene und einer ergebnisbasierten Arbitierung in der niedrigeren Verhaltensebene realisiert wird. Dieser Ansatz unterstützt sowohl die Funktionalität der Referenzarchitektur, da er eine effiziente Skalierbarkeit des Funktionsumfanges zulässt, als auch die Modifizierbarkeit, da funktionale Änderungen auf wenige und klar umrissene Stellen begrenzt werden. Grundsätzlich bietet das Konzept einer überlagerten Koordinationsebene den Vorteil, dass es eine funktionale Trennung zwischen den berechnenden Funktionen und den Funktionen zur Steuerung der Manöverausführung und zum Handling des Assistenzkonzepts ermöglicht.

Eine exemplarische Umsetzung der Referenzarchitektur im Rahmen einer konkreten Anwendung ist nicht Bestandteil dieser Arbeit. Stattdessen wird die Referenzarchitektur angelehnt an die Methode der szenariobasierten Architekturbewertung hinsichtlich ihrer Qualitätsmerkmale qualitativ diskutiert. Dabei wird untersucht, ob und in welchem Umfang die verfolgten Architekturansätze die Erfüllung der geforderten nichtfunktionalen Anforderungen Funktionalität, Änderbarkeit und Testbarkeit unterstützen. Über deren Erfüllung definiert sich die Qualität des Architekturentwurfes. Im Rahmen dieser qualitativen Architekturdiskussion konnte die Referenzarchitektur hinsichtlich der Erfüllung der Anforderung nicht falsifiziert werden.

Zusammengefasst zeichnet sich die hier vorliegende Referenzarchitektur dadurch aus, dass sie ihren Anwendungsbereich so weit fasst, dass alle identifizierten Freiheitsgrade zur energetischen Beeinflussung darin enthalten sind. Dies begünstigt nicht nur eine breite Anwendbarkeit, sondern unterstützt auch die Modifizierbarkeit, da potentielle Änderungen bereits in Referenzarchitektur berücksichtigt werden. Die dann im Architekturentwurf umgesetzten Architekturansätze wiederum tragen ihren Teil dazu bei, die Anpassungsfähigkeit, Verständlichkeit sowie Änderbarkeit und Testbarkeit zu erhöhen.

Die entwickelte funktionale Referenzarchitektur stellt somit eine dokumentierte Grundlage für die Entwicklung von Assistenzsystemen zur energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebs dar. Durch ihre Nutzung können die zu betreibenden Aufwände beim anwendungsbezogenen Architekturentwurf reduziert werden, da die Referenzarchitektur bereits wichtige Erkenntnisse aus dem Anwendungsbereich enthält und dadurch den Aufwand für die Entwicklungstätigkeit reduzieren kann. Gleichzeitig leistet diese Arbeit auch einen Beitrag zur Fahrzeugsystemtechnik, da sie nicht funktionale Umsetzungen sowie Nachweise über deren Machbarkeit in den Vordergrund stellt, sondern explizit grundlegende architektonische Aspekte diskutiert.

Zur Validierung, ob sich die im Architekturentwurf verfolgten Ansätze in der Praxis bewähren, sind weitere Untersuchungen notwendig. Dies kann durch eine Nutzung der Referenzarchitektur in konkreten Entwicklungsvorgaben geschehen, in denen die Anwendbarkeit bzw. deren Grenzen untersucht werden. Idealerweise fließen die Erkenntnisse daraus in den Entwurf der Referenzarchitektur wieder zurück, sodass diese iterativ verbessert wird, um den Anwendungsbereich zusehends vollständiger zu erfassen und zentrale funktionale Aspekte zu detaillieren. Neben der Nutzung der Referenzarchitektur in konkreten Entwicklungsvorgaben kann auch eine Expertenevaluierung dazu beitragen die vorgeschlagene Architektur hinsichtlich ihrer Qualität zu bewerten. Im Zuge der voranschreitenden Automatisierung der Fahrzeugführung ist eine detaillierte Untersuchung notwendig, ob und wie sich die identifizierten Optimierungsansätze mit unterschiedlichen Ausprägungen von Architekturen für das hochautomatisierte und autonomen Fahren vereinbaren lassen.

A Optimierungsfunktionen

Im Folgenden sind für die jeweiligen Optimierungsfunktionen (vgl. Kapitel 4.1.2) benötigten Vorausschauinformationen und berechnete Ausgangsgrößen zusammengefasst. Zusätzlich ist beschrieben, welche assistenzkonzeptabhängigen Outputs daraus resultieren.

Tabelle A-1: Optimierungsfunktion Routenplanung

Vorausschauinformationen	**Ausgangsgröße**	**Assistenzansatz und Output**
Repräsentation des Straßennetzwerkes (aus digitaler Karte); Verkehrs- und Infrastrukturdaten (aktuell und prädiziert), Wetterinformationen	Routenplan (Reihenfolge zu befahrender Straßen); Startzeitpunkt	**Fall A): Empfehlend** Output Fahrer: Auswahl an passenden Routen, Routenführung (über Navigationssystem)

Tabelle A-2: Optimierungsfunktion Fahrweisenplanung (ferner Horizont)

Vorausschauinformationen	**Ausgangsgröße**	**Assistenzansatz und Output**
Ferner Horizont: Straßengenaue Vorausschauinformationen entlang der Route bis zum Ziel (Topographieinformationen, Grenzgeschwindigkeiten (statisch), Verkehrslage)	Geschwindigkeitstrajektorie (abschnittsweise Zielgeschwindigkeit)	**Fall A): Empfehlend** Output für Fahrer: Sollgeschwindigkeit (z. B. über ein Display oder als Pedalbedienempfehlung) **Fall B): Ausführend** Output für Automatisierung: Setzgeschwindigkeit

Tabelle A-3: Optimierungsfunktion Integrierte Planung der Fahrweise und der Betriebsmodi (nicht-hybrider Antriebstrang)

Vorausschauinformationen	**Ausgangsgröße**	**Assistenzansatz und Output**
Fahrstreifengenaue Vorausschauinformationen in nahen und bis und mittleren Horizont - Topographieinformationen - Grenzgeschwindigkeiten (statisch/dynamisch) - aktuelle und prädizierte Objekteigenschaften von Verkehrsmitteln und Verkehrsinfrastruktur - aktuelle und prädizierte Verkehrslage (Einfluss auf Grenzgeschwindigkeit)	Geschwindigkeitstrajektorie Sollwerttrajektorien für Antriebsmaschine und Getriebe/Kupplung (zur Darstellung einer Sollgeschwindigkeitstrajektorie)	**Fall A): Empfehlend** Output für Fahrer: Sollgeschwindigkeit/-Beschleunigung bzw. Pedalbedienempfehlung + Getriebesollstufe/Kupplungssollzustand (bei manuellem Getriebe) **Fall B): Ausführend** Output für Automatisierung: Sollwertvorgaben für Antriebsmaschine und Getriebe/Kupplung + Sollgeschwindigkeit (für überlagerte v-Regelung)

Tabelle A-4: Optimierungsfunktion Integrierte Planung der Fahrweise und der Betriebsmodi (hybrider Antriebstrang)

Vorausschauinformationen	**Ausgangsgröße**	**Assistenzansatz und Output**
Fahrstreifengenaue Vorausschauinformationen in nahen und bis und mittleren Horizont - Topographieinformationen - Grenzgeschwindigkeiten (statisch/dynamisch) - aktuelle und prädizierte Objekteigenschaften von Verkehrsmitteln und Verkehrsinfrastruktur - aktuelle und prädizierte Verkehrslage (Einfluss auf Grenzgeschwindigkeit)	Geschwindigkeitstrajektorie Sollwerttrajektorien für alle Energiewandler und Kennungswandler (zur Darstellung einer Sollgeschwindigkeitstrajektorie)	**Fall B): Ausführend** Output für Automatisierung: Sollwertvorgaben für Energiewandler und Kennungswandler für Umsetzung Geschwindigkeitsprofil und Betriebsmodus + Sollgeschwindigkeit **Fall C): Kombiniert** Output für Fahrer: Sollgeschwindigkeit/-beschleunigung bzw. Pedalbedienempfehlung Output für Automatisierung: Sollwertvorgaben für Energiewandler und Kennungswandler für Umsetzung Fahrervorgabe

Tabelle A-5: Optimierungsfunktion Fahrweisenplanung (ohne Betriebsmodus-Planung)

Vorausschauinformationen	**Ausgangsgröße**	**Assistenzansatz und Output**
Fahrstreifengenaue Vorausschauinformationen in nahen und bis und mittleren Horizont - Topographieinformationen - Grenzgeschwindigkeiten (statisch/dynamisch) - aktuelle und prädizierte Objekteigenschaften von Verkehrsmitteln und Verkehrsinfrastruktur - aktuelle und prädizierte Verkehrslage (Einfluss auf Grenzgeschwindigkeit)	Geschwindigkeitstrajektorie (alternativ: Sollmoment am Rad)	**Fall A): Empfehlend** Output für Fahrer: Sollgeschwindigkeit (z. B. überein Display oder als Pedalbedienempfehlung) **Fall B): Ausführend** Output für Automatisierung: Setzgeschwindigkeit

Tabelle A-6: Optimierungsfunktion Vorausschauendes Energiemanagement: State-Of-Charge Planung und Betriebsmodusplanung (hybrider Antriebsstrang)

Vorausschauinformationen	**Ausgangsgröße**	**Assistenzansatz und Output**
Ferner Horizont: Straßengenaue Vorausschauinformationen entlang der Route bis zum Ziel (Topographieinformationen, Grenzgeschwindigkeiten (statisch), Verkehrslage)	Leittrajektorie für den SoC	**Fall B): Ausführend** Output für Automatisierung: SoC-Richtwerte (als Randbedingung für die Bestimmung der Leistungsverteilung durch die Hybridbetriebsstrategie)
Mittlerer Horizont: Prädiktion des Geschwindigkeitsprofils sowie daraus abgeleitet Prädiktion des Energieflusses am Rad unter Nutzung von Topographieinformation; Wetterinformationen	Sollwerttrajektorien bzw. Leistungsverteilung zwischen Energiewandlern (zur Darstellung der Fahrervorgaben) Sollwerttrajektorien für Nebenaggregate (thermische Nebenfunktionen)	**Fall B): Ausführend** Output für Automatisierung: Sollwertvorgaben für Energiewandler und Kennungswandler

B Qualitätsszenarien

QS 1a bzw. 1b	Ableitung Architekturinstanz für Systemauslegung A bzw. B
Ausgangslage	Es soll ein Assistenzsystem zur energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebs entwickelt werden. Es liegt kein Referenzsystem vor
Quelle und Stimulus	Auftrag zur Intialentwicklung gemäß Systemlausprägung A bzw. B
Artefakt	Noch kein Artefakt vorhanden, da Initialentwicklung
Soll-Ergebnis	• Die erforderlichen funktionalen Bestandteile für das geforderte spezifische Systemverhalten sollen sich anhand der Referenzarchitektur effizient identifizieren und in Form einer konkreten Architekturinstanz abbilden lassen • Die vorgesehenen Modulkompetenzen und Schnittstellen der Referenzarchitektur sollen erhalten bleiben. Instanziierungen sollen keine architektonische Anpassung erfordern (Ergänzung nicht vorhergesehener Module und Schnittstelle/Änderung der Modulkompetenzen)

QS 2a	Übertragung eines Assistenzsystems für einen konv. Antriebsstrang auf einen hybriden Antriebsstrang
Ausgangslage	Es liegt ein bestehendes Assistenzsystem zur energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebs vor
Quelle und Stimulus	Auftrag zur Übertragung eines bestehenden Systems von einem Fahrzeug mit konventionellem Antriebsstrang auf einen hybriden Antriebsstrang unter Beibehaltung der Optimierungsfunktionen
Artefakt	[Referenzsystem] Gesamtsystem mit mehreren fahrstreifenbezogenen Optimierungsfunktionen (jeweils integrierte Planung für Fahrweise und Betriebsmodi, Assistenzkonzept empfehlend und ausführend)
Soll-Ergebnis	• Stellen für benötigte Änderungen sollen innerhalb kurzer Zeit identifiziert werden und klar erkennbar sein • Die bestehenden Funktionsmodule sollen nach Möglichkeit unverändert bleiben. Sind Änderungen notwendig, sollen die betroffenen Module über definierte Schnittstellen einfach austauschbar sein. Sind neue Module erforderlich, sollen diese über bereits vorgesehene Schnittstellen integrierbar sein

QS 2b	**Übertragung eines Assistenzsystems für einen Fahrzeug mit reduzierter Vorausschausensorik**
Ausgangslage	Es liegt ein bestehendes Assistenzsystem zur energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebs vor
Quelle und Stimulus	Auftrag zur Übertragung eines bestehenden Systems von einem Fahrzeug mit definierter Vorausschausensorik auf ein anderes Fahrzeug mit im Vergleich dazu reduzierter Vorausschausensorik
Artefakt	[Referenzsystem] Gesamtsystem mit mehreren fahrstreifenbezogenen Optimierungsfunktionen (jeweils integrierte Planung für Fahrweise und Betriebsmodi, Assistenzkonzept empfehlend und ausführend)
Soll-Ergebnis	• Stellen für benötigte Änderungen sollen innerhalb kurzer Zeit identifiziert werden und klar erkennbar sein • Die bestehenden Funktionsmodule sollen nach Möglichkeit unverändert bleiben. Sind Änderungen notwendig, sollen die betroffenen Module über definierte Schnittstellen einfach austauschbar sein. Sind neue Module erforderlich, sollen diese über bereits vorgesehene Schnittstellen integrierbar sein

QS 3	**Erweiterung eines bestehenden Sets an Optimierungsfunktionen um zusätzliche Optimierungsfunktionen**
Ausgangslage	Es liegt ein bestehendes Assistenzsystem zur energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebs vor
Quelle und Stimulus	Auftrag zur Erweiterung eines bestehenden Systems mit zusätzlichen Optimierungsfunktionen A) Erweiterung um Funktionen im fernen Horizont B) Erweiterung um Funktionen im nahen/mittleren Horizont
Artefakt	[Referenzsystem] Gesamtsystem mit mehreren fahrstreifenbezogenen Optimierungsfunktionen (jeweils integrierte Planung für Fahrweise und Betriebsmodi, Assistenzkonzept empfehlend und ausführend)
Soll-Ergebnis	• Stellen für benötigte Änderungen sollen innerhalb kurzer Zeit identifiziert werden und klar erkennbar sein • A) Optimierungsfunktionen für den fernen Horizont sollen einfach an das Assistenzmodul und die Optimierungsfunktionen über vorgesehene Schnittstellen ankoppelbar sein • B) Eine ggf. benötigte Anpassung des Mechanismus zum Aufruf der geänderten Optimierungsfunktion soll möglichst lokal (zentral) durchführbar sein

QS 4	**Funktionale Erweiterung einer bestehenden Optimierungsfunktionen**
Ausgangslage	Es liegt ein bestehendes Assistenzsystem zur energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebs vor
Quelle und Stimulus	Auftrag zur Erweiterung einer bestehenden Optimierungsfunktion auf Grundlage eines identifizierten Verbesserungspotentials
Artefakt	[Referenzsystem] Gesamtsystem mit mehreren fahrstreifenbezogenen Optimierungsfunktionen (jeweils integrierte Planung für Fahrweise und Betriebsmodi, Assistenzkonzept empfehlend und ausführend)
Soll-Ergebnis	• Stellen für benötigte Änderungen sollen innerhalb kurzer Zeit identifiziert werden und klar erkennbar sein • Die Änderungen an einer Optimierungsfunktion sollen unabhängig von den anderen Optimierungsfunktionen möglich sein • Eine ggf. benötigte Anpassung des Mechanismus zum Aufruf der geänderten Optimierungsfunktion soll möglichst lokal (zentral) durchführbar sein

QS 5	**Entfernen einer bestehenden Optimierungsfunktionen**
Ausgangslage	Es liegt ein bestehendes Assistenzsystem zur energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebs vor
Quelle und Stimulus	Auftrag zur Entfernung einer bestehenden Optimierungsfunktion auf Grundlage eines Löschungsbedarfes (z.B. aufgrund von regulatorischer Randbedingungen)
Artefakt	[Referenzsystem] Gesamtsystem mit mehreren fahrstreifenbezogenen Optimierungsfunktionen (jeweils integrierte Planung für Fahrweise und Betriebsmodi, Assistenzkonzept empfehlend und ausführend)
Soll-Ergebnis	• Stellen für benötigte Änderungen sollen innerhalb kurzer Zeit identifiziert werden und klar erkennbar sein • Die Entfernung einer Optimierungsfunktionen soll unabhängig von den anderen Optimierungsfunktionen möglich sein • Eine ggf. benötigte Anpassung des Mechanismus zum Aufruf der geänderten Optimierungsfunktion soll möglichst lokal (zentral) durchführbar sein

QS 6	**Funktionsorientiertes Testen**
Ausgangslage	Es liegt ein bestehendes Assistenzsystem zur energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebs vor
Quelle und Stimulus	Wunsch nach effizienter Testfallgenerierung, -durchführung und -analyse.
Artefakt	[Referenzsystem] Gesamtsystem mit mehreren fahrstreifenbezogenen Optimierungsfunktionen (jeweils integrierte Planung für Fahrweise und Betriebsmodi, Assistenzkonzept empfehlend und ausführend)
Soll-Ergebnis	• Möglichst viele Bestandteile sollen sich funktional unabhängig voneinander testen lassen um eine effiziente Testgenerierung und -durchführung zu unterstützen. • Tester soll bei fehlerhaften Verhalten des Systeme in kurzer Zeit die betroffene Funktion lokalisieren können.

C Abgeleitete Architekturinstanzen

Im Folgenden sind die im Rahmen der Qualitätsszenarien QS1a und QS1b aus der Referenzarchitektur abgeleiteten Architekturinstanzen abgebildet. Für eine Beschreibung der Systemausprägungen siehe S. 115 Tabelle 5-2.

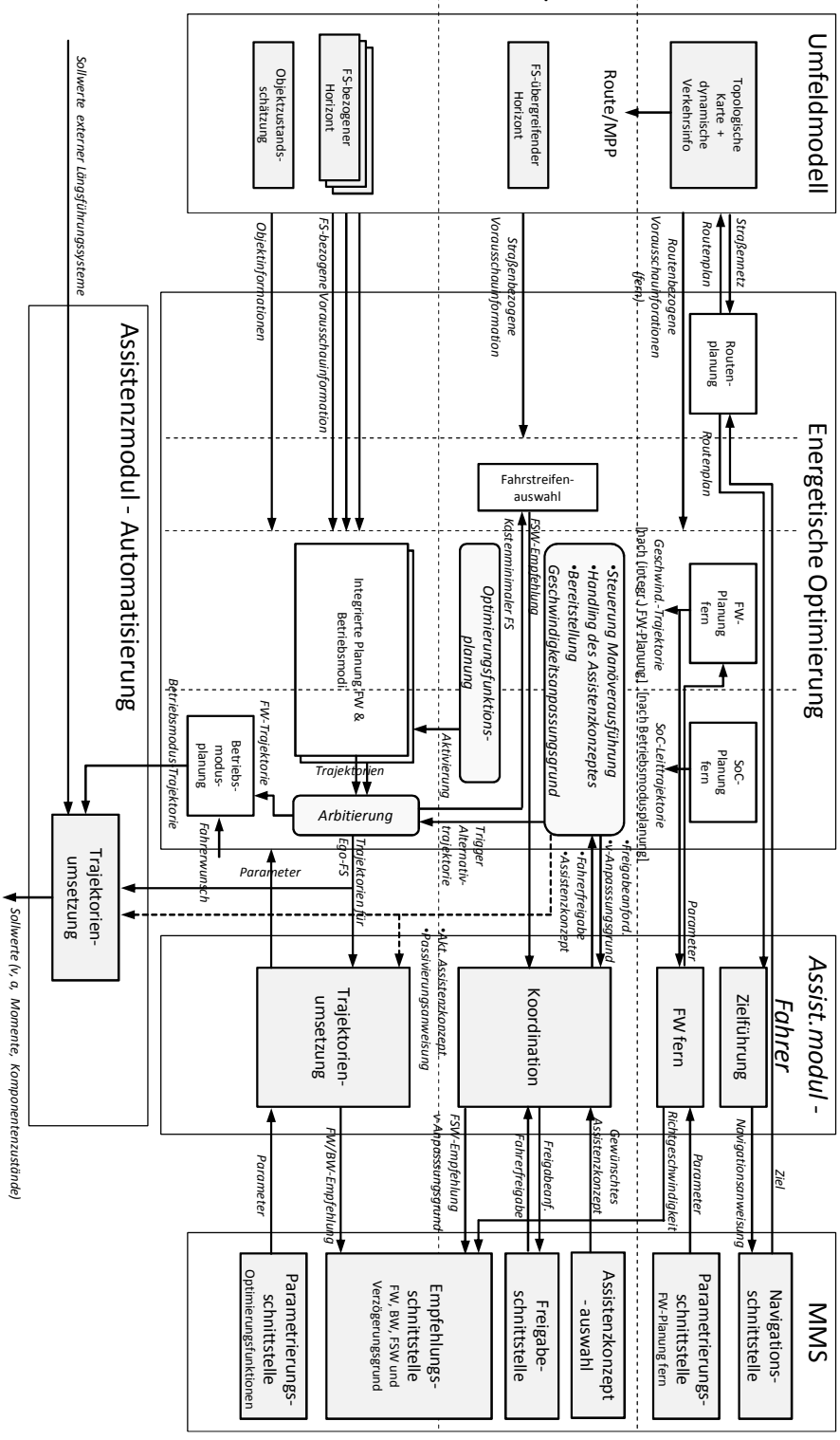

Abbildung C-1: Qualitätsszenario QS1a I - Systemausprägung A

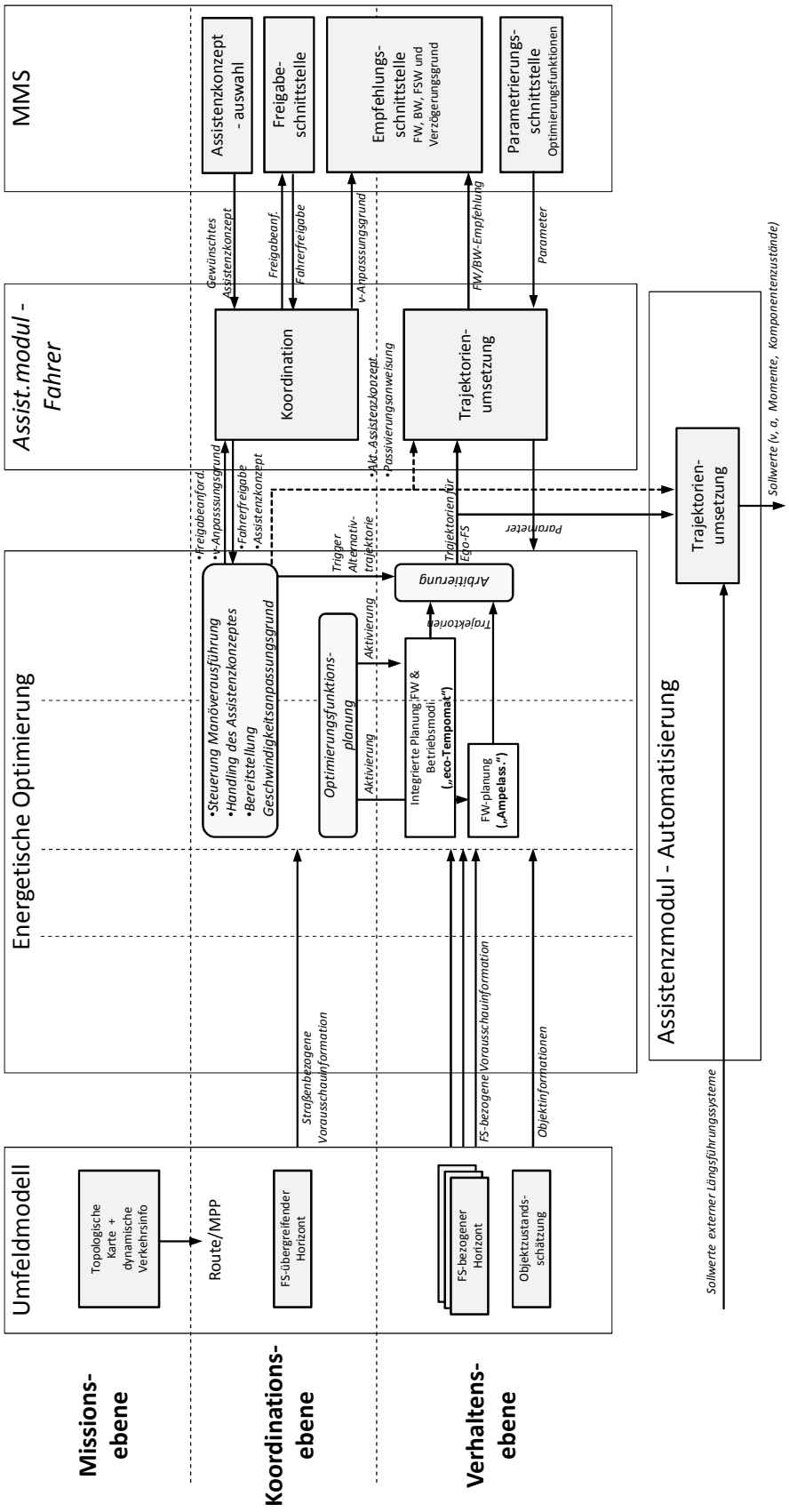

Abbildung C-2: Qualitätsszenario QS1b - Systemausprägung B

Literaturverzeichnis

Albus, J.: The NIST Real Time Control System (RCS): An Approach to Intelligent Systems Research. In: Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence, Volume 9, Issue 2-3, 1997

Albus, J.: 4-D/RCS Reference Model Architecture for Unmanned Ground Vehicles. In: Proceedings of the AeroSense Session on Unmanned Ground Vehicle Technology, 2000

Ambühl, D.: Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicles. Dissertation, ETH Zürich, Institut für Mess- und Regeltechnik, 2009

Ammoser, H.; Hoppe, M,: Glossar Verkehrswesen und Verkehrswissenschaften. Technische Universität Dresden, Institut für Wirtschaft und Verkehr, Dresden 2006

Back, M.: Prädiktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen. Dissertation. Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2005

Bass, L.; Clements, P.; Kazman, R.: Software Architecture in Practice, 3. Auflage, Pea son Education, Upper Saddle River, 2013

Bier, M.; Kluin, M.; Beidl, C.: Strukturierte Betriebsstrategie für Hybridfahrzeuge. In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, Ausgabe 05-2012, 2012

Bratzel, S.: The Car of the Future is Driven Electrically!? In: 16. Internationaler Fachkongress „Fortschritte in der Automobil-Elektronik“. 19. – 20.Juni 2012 in Ludwigsburg, 2012

Brooks, R.: A Robust Layered Control System for a Mobile Robot. In: IEEE Journal of Robotics and Automation, Volume 2, No. 1, 1986

Bubb, H.: Der Fahrprozess—Informationsverarbeitung durch den Fahrer. VDA 4. Technischer Kongress “Sicherheit durch Elektronik”, 20.–21.03.2002, Stuttgart, 2002

Donges, E.: Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. In: Automobil-Industrie 2/82, S. 183–190, Vogel Business Media GmbH & Co. KG, Würzburg, 1982

Dornieden, B.; Junge, L.; Pascheka, P.: Vorausschauende energieeffiziente Fahrzeuglängsregelung. In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, Ausgabe 03-2012, 2012

Dorrer, C.: Effizienzbestimmung von Fahrweisen und Fahrerassistenz zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs unter Nutzung telematischer Informationen. Dissertation Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen der Universität Stuttgart, ExpertVerlag, Renningen, 2004

Eicker, S.; Hegmanns, C.; Malich, S.: Auswahl von Bewertungsmethoden für Softwarearchitekturen. In: ICB Research Report, Nr. 14, 2007, Institut für Informatik und Wirtschaftsinformatik der Universität Duisburg Essen, Essen, 2007

Fiedler, G.: Use Cases. http://www.is.informatik.uni-kiel.de/~fiedler/teaching/ss2004/prak/UseCases.pdf, 2004, Zugriff Januar 2017

Flehmig, F.; Kästner, F.; Knödler, K.; Knoop, M.: Eco-ACC für Elektro- und Hybridfahrzeuge. In: Siebenpfeiffer, W.: Fahrerassistenzsysteme und Effiziente Antriebe, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015

Fuchs, H.; Hofmann, F.; Löhr, H.; Schaaf, G.: Car-2-X. In: Winner, H.; Hakuli, S.; Lotz, F.; Singer, C.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 3. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015

Geyer, S.; Baltzer, M.; Franz, B.; Hakuli, S.; Kauer, M.; Kienle, M.; Meier, S.; Weißberger, T.; Bengler, K.; Bruder, R.; Flemisch, F. O.; Winner, H.: Concept and Development of a Unified Ontology for Generating Test and Use Case Catalogues for Assisted and Automated Vehicle Guidance. In: IET Intelligent Transport Systems, Volume 8, Issue 3, 2014

Gollnick, V.: Untersuchungen zur Bewertung der Transporteffizienz verschiedener Verkehrsmittel. Dissertation, Technischen Universität München, 2004

Guan, T.; Frey, W.: Predictive Fuel Efficiency Optimization using Traffic Light Timings and Fuel Consumption Model. In: Proceedings of the 16th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems. 06.-09.10.2013, Den Haag, Niederlande, 2013

Haken, K.-L.: Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik. 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2011

Haupt, C.: Ein multiphysikalisches Simulationsmodell zur Bewertung von Antriebs- und Wärmemanagementkonzepten im Kraftfahrzeug. Dissertation, Technischen Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, München, 2013

Hertzberg, J.; Lingemann, K.; Nüchter, A.: Mobile Roboter, Springer-Verlag, Berlin, 2012

Heyes, D.; Zimmermann, A.; Daun, T.; Lienkamp, M.: Der Virtuelle Fahrtrainer – ein prädiktives Verbrauchsassistenzsystem für schwere Nutzfahrzeuge. In: 6. Tagung Fahrerassistenz. 28.-29. November 2013 in München, 2013

Hofmann, P.: Hybridfahrzeuge – Ein alternatives Antriebskonzept für die Zukunft. Springer-Verlag, Wien, 2010

Hohm, A.; Lotz, F.; Fochler, O.; Lüke, S; Winner, H.: Automated Driving in Real Traffic: From Current Technical Approaches towards Architectural Perspectives. In: SAE Technical Paper 2014-01-0159, SAE World Congress 2014, Detroit, 2014

Hudi, R.: Trends and Future Challenges for E/E Development. In: 16. Internationaler Fachkongress „Fortschritte in der Automobil-Elektronik“. 19. – 20.06.2012 in Ludwigsburg, 2012

Ionita, M.T.; Hammer, D. K.; Obbink, H.: Scenario-Based Software Architecture Evaluation Methods: An Overview. Workshop on Methods and Techniques for Software Architecture Review and Assessment at the International Conference on Software Engineering, 2002

Kalmbach, R.; Bernhart, W.; Grosse Kleinmann, P.; Hoffmann, M.: Automotive landscape 2025. Studie, Roland Berger Strategy Consultants, http://www.nextpractice.de/files/PDF/en/Automotive%20landscape%202025_opportunities%20and%20challenges_Study_Roland%20Berger-2011.pdf, 2011, Zugriff Januar 2017

Kazman, R.; Abowd, G.; Bass, L.; Clements, P.: Scenario-Based Analysis of Software Architecture. In: IEEE Software, Volume: 13, Issue: 6, 1996

Kazman, R.; Klein, M.; Clements, P.: ATAM: Method for Architecture Evaluation. In: Technical Report, Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 2000

Khayyam, H.; Nahavandi, S.; Hub, E.; Kouzani, A.; Chonka, A.; Abawajy, J.; Marano. V.; Davis, S.: Intelligent energy management control of vehicle air conditioning via look-ahead system. In: Applied Thermal Engineering, Volume 31, Issue 16, 2011

Kleine-Besten, T.; Kersken, U.; Pöchmüller, W.; Schepers, H.; Mlasko, T.; Behrens, R.; Engelsberg, A.: Navigation und Verkehrstelematik. In: Winner, H.; Hakuli, S.; Lotz, F.; Singer, C.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 3. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015

Kluin, M.: Durchgängige modellbasierte Methoden zur Entwicklung vernetzter Betriebsstrategien für ottomotorische Hybridantriebe. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe, Darmstadt, 2015

Kohlhaas, R.; Schamm, T.; Nienhäuser, D.; Zöllner, J.M.: Anticipatory Energy Saving Assistant for Approaching Slower Vehicles. In: 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. 05.-07.10.2011, Washington, DC, USA, 2011

Kortenkamp, D.; Simmons, R.: Robotic Systems Architectures and Programming. In: Siciliano, B.; Khatib, O.: Springer Handbook of Robotics, Springer-Verlag, Berlin, 2008

Korzenietz, P.; Winner, H.: Eine generische Systemarchitektur zur energetischen Optimierung von Fahrzeugen mithilfe von Fahrerassistenzsystemen. In: Tagungsband WKM Symposium 2014, 25-26.06.2014 in Aachen, 2014

Kunkel, F.: Optimaler Betrieb von Dieselhybridantrieben. Dissertation. Technischen Universität Darmstadt, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, 2015

Lederer, M.: Energieeffizientes Fahren. In: Liebl, J.; Lederer, M.; Rohde-Brandenburger, K.; Biermann, J.-W.; Roth, M.; Schäfer, H.: Energiemanagement im Kraftfahrzeug, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014

Lotz, F.: System Architectures for Automated Vehicle Guidance Concepts. In: Maurer, M.; Winner, H.: Automotive Systems Engineering, Springer-Verlag, Berlin, 2013

Lotz, F.: Eine Referenzarchitektur für die assistierte und automatisierte Fahrzeugführung mit Fahrereinbindung. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, 2017

Markschläger, P.; Wahl, H.-G.; Weberbauer, F.; Lederer, M.: Assistenzsystem für mehr Kraftstoffeffizienz. In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, Ausgabe 11-2012, 2012

Matthaei, R.: Wahrnehmungsgestützte Lokalisierung in fahrstreifengenauen Karten, Dissertation, TU Braunschweig, Shaker Verlag, Aachen, 2015

Maurer, M.: Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen, Dissertation, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik der Universität der Bundeswehr München, 2000

Mitschke, M.; Wallentowitz, H.: Dynamik der Kraftfahrzeuge. 5. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014

Müller, M.; Reif, M.; Pandit, M.; Staiger, W.: Ein prädiktives, sich an Fahrzeugumddaten anpassendes Gangwechselssystem für Kfz. In: at – Automatisierungstechnik 52, 2004

Neunzig, D.: Fahrerassistenzsysteme zur Verbrauchsminderung von Kraftfahrzeugen. Techn. Hochschule Aachen (RWTH Aachen), Diss. Forschungsges. Kraftfahrwesen (fka), Aachen, 2003

Pandazis, J.-C.: Navigation, Cooperative Driving and EcoMobility. In: Navigare 2010, 30.06.2010, Lausanne, Schweiz, 2010

Protschky, V.; Wiesner, K.; Feit, S.: Adaptive Traffic Light Prediction via Kalman Filtering. In: 2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), June 8.-11.06.2014. Dearborn, Michigan, USA, 2014

Protschky, V.; Feit, S.: Traffic Light Assistance – Ein innovativer Mobilitätsdienst im Fahrzeug. In: Linnhoff-Popien, C.; Zaddach, M.; Grahl, A.: Marktplätze im Umbruch, Springer-Verlag, Berlin, 2015

Pudenz, K.: Eco-Routing: Spezielle Navigationsalgorithmen optimieren Energiebilanz. https://www.springerprofessional.de/automobil---motoren/eco-routing-spezielle-navigationsalgorithmen-optimieren-energieb/6561404, 2011, , Zugriff Januar 2017

Pudenz, K.: Vorausschauendes Fahren: bei BMW lernt der Antrieb sehen. https://www.springerprofessional.de/automobil---motoren/vorausschauendes-fahren-bei-bmw-lernt-der-antrieb-sehen/6590278, 2012, Zugriff Januar 2017

Radke, T.: Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Fakultät für Maschinenbau, 2013

Radke, T.; Fischer, U.; Huber, A.; Naumann, M.; Ritzert, J.;Wagner, A.: Connected Energy-Based Powertrain Control for Various Hybrid Vehicle Topologies. In: 23rd Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2014, Aachen, 2014

Richter, M.; Zinser, S.; Kabza, H.: Comparison of Eco and Time Efficient Routing of ICEVs , BEVs and PHEVs in Inner City Traffic. In: 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 9.-12.10.2012, Seoul,Korea, 2012

Rohde-Brandenburger, K.: Verbrauch in Fahrzyklen und im Realverkehr. In: Liebl, J.; Lederer, M.; Rohde-Brandenburger, K.; Biermann, J.-W.; Roth, M.; Schäfer, H.: Energiemanagement im Kraftfahrzeug, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014

Rohde-Brandenburger, K.: Bewertungsansätze zu Verbrauch und Fahrleistung r. In: Liebl, J.; Lederer, M.; Rohde-Brandenburger, K.; Biermann, J.-W.; Roth, M.; Schäfer, H.: Energiemanagement im Kraftfahrzeug, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014

Roth, M.; Radke, T.; Lederer, M.; Gauterin, F.; Frey, M.; Steinbrecher, C.; Schröter, J.; Goslar, M .: Porsche InnoDrive – An Innovative Approach for the Future of Driving. In: 20th Aachen Colloquium Automobil and Engine Technology, 10.-12.10.2011 Aachen, 2011

Roth, M.: Betriebsstrategien. In: Liebl, J.; Lederer, M.; Rohde-Brandenburger, K.; Biermann, J.-W.; Roth, M.; Schäfer, H.: Energiemanagement im Kraftfahrzeug, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014

Sanfridson, M.; Lundgren A.; Jarlengrip, J.; Grubb G.; Feng, L.; Bruce, M.: Deliverable D54.3 – Active Green Driving: 1st System Functionality. http://www.haveit-eu.org/LH2Uploads/ItemsContent/24/HAVEit_212154_D54.3_Public.pdf, 2011, Zugriff Januar 2017

Schäufelle, J.; Zurawka, T.: Automotive Software Engineering. Grundlagen, Prozesse, Methoden und Werkzeuge effizient einsetzen. 3. Auflage, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2006

Scheuch, V.; Kaiser, G.; Holzmann, F.; Glaser, S.: Simplified Architecture by the Use of Decision Unit. In: Meyer, G.: Advanced Microsystems for Automotive Applications 2012, S.121-130, Springer-Verlag, Heidelberg, 2012

Schneider, T.: Audi Urban Future Initiative - Auf der grünen Welle. http://blog.audi.de/2014/11/04/auf-der-grunen-welle/, 2014, Zugriff Januar 2017

Schönherr, K.: Kopplung von Sensorinformationen und Geodaten zur modellbasierten Lokalisierung und Kartierung im Automobil. Dissertation, Technische Universität München, 2011

Schraut, M.: Umgebungserfassung auf Basis lernender digitaler Karten zur vorausschauenden Konditionierung von Fahrerassistenzsystemen. Disssertation, Techische Universität München, Lehrstuhl für Realzeit-Computersysteme, 2000

Schuricht, P.; Michler, O.; Bäker, B.: Efficiency-Increasing Driver Assistance at Signalized Intersections using Predictive Traffic State Estimation. In: 2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 05-07.10.2011, Washington, DC, USA, 2011

Starke, G.: Effektive Softwarearchitekturen. 6. Auflage, Hanser, München, 2014

Themann, P.: Automatisierte Fahrzeuglängsführung zur Optimierung der Energieeffizienz unter Nutzung kooperativer Informationen. D82 (Dissertation RWTH Aachen), Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen (fka), Aachen, 2015

Themann, P.; Zlocki, A.; Eckstein, L.: Energieeffiziente Fahrzeuglängsführung durch V2X-Kommunikation. In: Siebenpfeiffer, W.: Fahrerassistenzsysteme und Effiziente Antriebe, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015

Terwen, S.: Vorausschauende Längsregelung schwerer Lastkraftwagen. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2010

Vogel, O.; Mehlig, U.; Neumann, T.; Arnold, I.; Chughtai, A.; Völter, M.; Zdun, U.: Software-Architektur, 2. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2009

Von der Beeck, M.: Deployment of logical and technical architectures for automotive systems. In: Software and System Modeling; Volume 6, Springer Verlag, S. 205-219, 2007

von Grundherr zu Altenthan und Weiyherhaus, J.: Ableitung einer heuristischen Betriebsstrategie für ein Hybridfahrzeug aus einer Online-Optimierung. Dissertation, Technischen Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, 2010

Vreeswijk, J.; Wilmink, I.; Gilka, P.; Vernet, G.; Andreone, L.; Pandazis, J.-C.; Themann, P.; Mathias, P.: eCoMove: integration of results and conclusions. In: 10th ITS European Congress, 16.-19.06.2014, Helsinki, 2014

Wilde, A.: Eine modulare Funktionsarchitektur für adaptives und vorausschauendes Energiemanagement in Hybridfahrzeugen. Dissertation, Technische Universität München, 2008

Wallentowitz, H.; Freialdenhoven, A.; Oleschewski, I.: Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2010

Zlocki, A.: Fahrzeuglängsregelung mit kartenbasierter Vorausschau. D82 (Dissertation RWTH Aachen), Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen (fka), Aachen, 2010

Eigene Veröffentlichungen

Korzenietz, P.; Kluin, M.; Winner, H.: A Generic System Architecture for Energetic Optimization of Vehicles by Using Driver Assistance Systems. In Proceedings of the ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2014, August 17-20, 2014, Buffalo, NY, USA, 2014

Korzenietz, P.; Winner, H.: Eine generische Systemarchitektur zur energetischen Optimierung von Fahrzeugen mithilfe von Fahrerassistenzsystemen. In: Tagungsband WKM Symposium 2014, 25-26. Juni2014 in Aachen, 2014

Korzenietz, P.; Kluin, M.; Winner, H.: Eine generische Systemarchitektur zur energetischen Optimierung von Fahrzeugen mithilfe von Fahrerassistenzsystemen. 6. Tagung Fahrerassistenz, 28.-29. November 2013, München

Korzenietz, P.: Requirements Analysis for a Universal System Architecture for Ecological and Economical Driver Assistance Systems. In: Maurer, M.; Winner, H.: Automotive Systems Engineering, Springer-Verlag, 2013

Habenicht, S.; Winner, H.; Bone, S.; Sasse, F.; Korzenietz, P.: A Maneuver-based Lane Change Assistance System. 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 05.-09. Juni 2011 in Baden-Baden, 2011

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name:	Peter Korzenietz
Geburtsdatum:	04.10.1983
Geburtsort:	Heydebreck

Schulzeit

1990 – 2003	Pestalozzi-Grundschule, Kelkheim Gymnasium Eichendorffschule, Kelkheim Gymnasiale Oberstufe Immanuel-Kant-Schule, Kelkheim

Studium

2003 – 2010	Studium des Allgemeinen Maschinenbaus, Technische Universität Darmstadt
09/2007 - 06/2008	Auslandsstudium an der Chalmers Tekniska Högskolan, Göteborg, Schweden
11/2010	Abschluss: Diplom-Ingenieur

Berufstätigkeit

04/2011 – 12/2014	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt
seit 05/2015	Entwicklungsingenieur im Bereich Serienentwicklung Fahrerassistenzsysteme bei der Daimler AG, Sindelfingen