

Framework zur skalierbaren Validierung automatisierter Fahrfunktionen anhand virtueller Testfahrten

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
von der KIT-Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
des
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

angenommene
Dissertation
von

M.Sc. Carl Esselborn
geb. in Otterndorf

Tag der mündlichen Prüfung:	1. Dezember 2025
Referent:	Prof. Dr.-Ing. Eric Sax
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Andreas Wagner

Kurzfassung

Vor der Freigabe automatisierter Fahrfunktionen wird im Rahmen der Validierung beim Hersteller geprüft, ob die Funktion die Erwartungen des Benutzers erfüllen wird. In dieser Dissertation wird ein neues Framework entwickelt, das bei der Validierung unterstützt, indem Fahrfunktionen in speziellen, virtuellen Testfahrten untersucht werden.

Die Ausstattungsquote von Fahrzeugen mit automatisierten Fahrfunktionen nimmt parallel zur steigenden Funktionalität solcher Systeme zu. Gleichzeitig erhöht sich aber auch der Aufwand in der Entwicklung, eine hohe Funktionsqualität zu gewährleisten, da die Anzahl der Schnittstellen mit anderen Funktionsmodulen und der algorithmische Umfang in gleichem Maße ansteigen. Zusätzliche Komplexität wird durch die zunehmende Zahl adressierter, funktionaler Szenarien erzeugt, in denen der Nutzer eine nachvollziehbare und kontinuierlich hohe Performance der Fahrfunktion erwartet. Angesichts dieser Herausforderungen wird der Stand der Technik von Validierungsmethoden systematisch untersucht und bewertet, um bestehende Defizite zu identifizieren. Ziel ist es, anhand der Validierung eine datenbasierte Grundlage für funktions-spezifische Entscheidungen in verschiedenen Phasen des Funktionsentwicklungsprozesses, beginnend bei der Planung der Funktionsfeatures bis hin zur Freigabe, zu schaffen.

Das Kernstück des Frameworks ist die Verwendung stochastisch berechneter, virtueller Routen, die im realen Straßennetz existieren und in ihrer Häufigkeit das reale Verkehrsgeschehen repräsentativ abbilden sollen. Das bedeutet, dass in der Realität stärker befahrene Straßen entsprechend häufiger in der virtuellen Testfahrt enthalten sind. Dafür werden unterschiedliche Routengenerierungsverfahren analysiert, systematisch eingeordnet und hinsichtlich defi-

nierter Kriterien bewertet sowie erstmals validiert, indem ein aus Floating Car Data abgeleiteter Verkehrsfluss als Referenz herangezogen wird. Das Umgebungsmodell wird vollständig anhand digitaler Kartendaten aufgebaut, sodass eine Skalierbarkeit auf jede in der Karte abgebildete Straße möglich ist.

Durch die Anwendung auf eine prädiktive Längsregelfunktion (PCC) findet eine prototypische Umsetzung des neuen Frameworks zur repräsentativen, virtuellen Testfahrt statt, die gleichzeitig als exemplarischer Machbarkeitsnachweis dient. Für die PCC werden die Metriken *Verfügbarkeit*, *Erlebbarkeit* sowie *Übernahmehäufigkeit* für virtuelle Testfahrten auf einer Strecke von ca. 290.000 km in Westeuropa ermittelt. Das Framework eignet sich für alle Fahrfunktionen, die Abhängigkeiten vom Streckennetz aufweisen und für die ein skalierbares Umgebungsmodell aufgebaut werden kann (z.B. anhand von Kartendaten).

Basierend auf der nachweisbaren Repräsentativität der virtuellen Routen kann der Hersteller erstmals Aussagen zum Funktionsverhalten in unterschiedlichen Regionen treffen. Da die Methode mit dem Model-in-the-Loop-Ansatz schon in frühen Entwicklungsphasen nutzbar ist, werden kostenintensive Fehlentwicklungen von Fahrfunktionen aufgrund fehlerhafter Anforderungen vermieden. Als Ergänzung zu bestehenden Validierungsmethoden integriert sich das Framework in den etablierten V-Modell-Entwicklungsprozess. Eine aus der praktischen Anwendung abgeleitete Rollenbeschreibung zum Aufbau des Frameworks rundet die wissenschaftliche Arbeit ab.

Abstract

Prior to the release of automated driving functions, the OEM is testing if the expectations of the user will be satisfied by the function. In this dissertation, a new framework is developed that supports the validation process by investigating driving functions in special virtual test drives.

The equipment rates of vehicles with automated driving functions increase with the rising functionality of such systems. At the same time, the development effort surges as the number of interfaces and the algorithmic scope are growing, while a quality standard needs to be ensured. Additional complexity is created by the higher number of possible functional scenarios, in which the driver is expecting a comprehensible and continuous level of functional performance. Considering these challenges, the state of the science and technology of validation methods is systematically investigated and evaluated in order to identify existing deficiencies. The goal is to leverage the validation in order to create a data-based foundation for decisions regarding the driving function during the different phases of the development process, beginning with the planning of the functional features and up to the release.

The core of the framework is the usage of stochastically calculated virtual routes, which exist in the real road network and which are supposed to represent the real traffic flow behavior. This implies that roads which carry a higher traffic in the real world are included more frequently in the virtual test drives. For that reason, different route generating methods are analyzed, systematically classified, and evaluated regarding a defined set of criteria. Those approaches are validated for the first time by making use of a traffic flow as a reference derived from floating car data. The environment model for the simulation within the virtual test drive is completely based on digital map data. Therefore, a high

scalability is possible, as all roads which are included in the map can be used as input for the test drive.

By applying the new framework for representative virtual test drives to the use case of a predictive longitudinal control function (PCC) in a prototypical implementation, the exemplary proof of concept was conducted. The PCC was investigated in virtual test drives along a distance of approximately 290,000 km in Western Europe based on the three metrics *availability*, *experience*, and *takeover frequency*. The framework can be applied to all driving functions that display dependencies on the road network and for which a scalable environment model can be supplied (e.g. based on map data).

Given the proven representivity of the virtual routes, the manufacturer is able to make statements regarding the functional behavior in different regions. Since the method is based on a model-in-the-loop approach, it can be applied in the early development phase already and cost-intensive mistakes due to wrong feature decisions and insufficient requirements can be avoided. Supplementing existing validation methods like the field test, the framework can be integrated into established development processes. Derived from practical application, a role description in order to set up the framework is added and therefore completes this scientific work.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Zeit als externer Doktorand am Institut für Technik der Informationsverarbeitung des Karlsruher Instituts für Technologie im Rahmen einer Industriepromotion bei der Porsche AG in Weissach. Ich möchte mich bei allen bedanken, die mich auf dem lehrreichen und herausfordernden Weg begleitet und unterstützt haben.

Herzlich danke ich meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Eric Sax für die Ermöglichung des Promotionsvorhabens, das ehrliche und beeindruckend schnelle Feedback zu jeder Ausarbeitung, das kritische Hinterfragen und die wertvollen Lehren, die ich auf fachlicher und persönlicher Ebene als enorme Bereicherung wahrgenommen habe. Danke auch für die Aufnahme in Ihre interdisziplinäre und organisationsübergreifende Doktorandengruppe, die mit ihrer breiten Kompetenz fruchtbare Diskussionen zu fast jedem wissenschaftlichen Thema erlaubt hat. Vielen Dank richte ich auch an Prof. Dr.-Ing. Andreas Wagner für die Übernahme des Korreferats sowie die Mitglieder der Prüfungskommission bestehend aus Prof. Dr.-Ing. Sören Hohmann, Prof. Dr.-Ing. Laurent Schmalen und Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Thomas Zwick.

Einen entscheidenden Beitrag zum Erfolg dieser Dissertation leistete das tägliche Arbeitsumfeld in der FAS/HAF-Entwicklung bei der Porsche AG. Besonderer Dank gebührt Michael Eckert, der mein Promotionsthema bei Porsche ins Leben gerufen und mich in die Welt der Fahrerassistenzsysteme geholt hat. Danke für die fachliche Begleitung und die hervorragende Zusammenarbeit. Danken möchte ich ebenfalls Marc Holzäpfel für die Einblicke in so viele spannende Projekte innerhalb seines Sachgebiets und Themen auch abseits meiner Promotion, Henry Patzig für das Einbeziehen in die gemeinsamen Erprobungsfahrten durch Europa und Eric Wahl für das wissenschaftliche Hinterfragen in

unseren Rücksprachen. Danke auch an Kai-Lukas Bauer für den stets wertvollen methodischen Input, an Sebastian Söhner für das Ermöglichen meines Forschungsaufenthalts in Kalifornien und an alle Kollegen des InnoCampus für die gemeinsame Zeit und kreativen Brainstormings.

Darüber hinaus möchte ich meine Wertschätzung für die jahrelange, vertrauensvolle Zusammenarbeit im gemeinsamen Forschungsfeld mit dem FZI Forschungszentrum Informatik zum Ausdruck bringen und mich bei Jacob Langner sowie Johannes Bach für den bereichernden Austausch bedanken.

Weiterhin bedanke ich mich bei allen Kollegen der Doktorandengruppe für das konstruktive Feedback, die herzliche Aufnahme in Karlsruhe zu den Doktorandenseminaren, die inspirierenden Gespräche bei den Doktorandenklausuren und natürlich für den kreativen Doktorhut.

Der größte Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden, die mir während der gesamten Zeit stets den Rücken gestärkt haben. Danke Dir, Christin, für Deine unerschöpfliche Geduld, Dein Verständnis, die Unterstützung beim Korrekturlesen, das Ermutigen in schwierigen Zeiten und den bedingungslosen Rückhalt, durch den diese Arbeit erst ermöglicht wurde.

Karlsruhe, im Dezember 2025

Carl Esselborn

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung der Dissertation	3
1.3	Umfeld	4
1.4	Aufbau	4
2	Technische und begriffliche Grundlagen	7
2.1	Fahraufgabe	7
2.2	Fahrerassistenzsysteme und Automatisierte Fahrsysteme	10
2.2.1	Systematische Einordnung von Fahrfunktionen	11
2.2.2	Featureumfang von Fahrfunktionen	16
2.2.3	Logische Architektur	17
2.3	Der Softwareentwicklungsprozess in der Automobilindustrie	21
2.4	Szenario-Begriff im Kontext von Fahrfunktionen	25
2.5	Straßennetz und digitale Karten für Fahrfunktionen	29
2.5.1	Aufbau einer Straße	29
2.5.2	Kategorisierung von Straßen	30
2.5.3	Aufbau von digitalen Karten	33
2.5.4	Kartentypen und deren Anwendung	37
2.6	Prädiktive Fahrfunktionen für assistiertes und automatisiertes Fahren	39
2.6.1	Vorteile prädiktiver Längsregelfunktionen	40
2.6.2	Aufbau und Funktionsweise der betrachteten PCC	43
2.6.3	Abgrenzung der PCC zu anderen automatisierten Fahr- funktionen	48
2.7	Verfahren zur Routengenerierung	50

2.7.1	Verwendung aufgezeichneter Routen	50
2.7.2	Bestehende Verfahren mit sequenzieller Kantenwahl .	52
2.7.3	Bestehende Verfahren mit globaler Routenberechnung	53
2.8	Floating Car Data als Informationsquelle	56
3	Validierung automatisierter Fahrfunktionen	59
3.1	Definitionen	60
3.2	Klassische Testmethoden	66
3.2.1	X-in-the-Loop-Verfahren (XiL)	67
3.2.2	Feldtest (FOT)	73
3.2.3	Probandenstudien und Objektivierung	74
3.3	Stand der Wissenschaft und Forschung für Validierungsmethoden	75
3.3.1	Szenario-basiertes Testen	77
3.3.2	Resimulation	79
3.3.3	Virtuelle Testfahrt	80
3.3.4	Shadow Mode	80
4	Neues Konzept zur Validierung prädiktiver Planungsalgorithmen	83
4.1	Abgeleitete Herausforderungen bei der Funktionsvalidierung .	83
4.1.1	Erweiterte Umfelderkennung	84
4.1.2	Zunahme und Verteilung relevanter Szenarien	85
4.1.3	Veränderung des Systemverbunds nach Marktfreigabe	86
4.1.4	Subjektive und kontextsensitive Komfortwahrnehmung	86
4.2	Randbedingungen und Anforderungen an neue Validierungsmethoden	88
4.2.1	Bestehende Anforderungen an die Funktionsvalidierung	88
4.2.2	Zusätzliche Anforderungen an die Funktionsvalidierung durch neue Herausforderungen	90
4.3	Einordnung aktueller Validierungsmethoden	92
4.3.1	Verfahren am Testort Realfahrzeug	94
4.3.2	Verfahren am Testort XiL	96
4.4	Offene Herausforderungen bei der Validierung	99

4.5	Neuartiger Ansatz zur Validierung	100
4.5.1	Repräsentative Validierung von Fahrfunktionen mit virtuellen Testfahrten	100
4.5.2	Anwendung des Konzepts auf Fahrfunktionen	103
4.6	Diskussion der Ergebnisse	109
5	Teststimulation anhand repräsentativer Routen	111
5.1	Motivation und Ziele der Teststimulation	111
5.2	Methode zur Bewertung von Routen anhand einer Referenz	113
5.2.1	Theoretische Überlegungen zur statistischen Validie- rung des SUT	113
5.2.2	Floating Car Data als Referenz	114
5.2.3	Abgleich der Häufigkeitsverteilung generierter Routen mit FCD anhand des Chi-Quadrat-Homogenitätstests	117
5.2.4	Definition der Merkmalskategorien	119
5.3	Implementierung und Vergleich von Verfahren zur Routenge- nerierung (RGE)	120
5.3.1	Globale Routenberechnung mit stochastischer Wahl von Start- und Zielpunkt	121
5.3.2	Systematische Routengenerierung mit der Destinati- onskreis-Methode	127
5.3.3	Abgleich der Routen mit Floating Car Data (FCD)	128
5.3.4	Vergleichende Bewertung der Verfahren zur Routenge- nerierung	130
5.3.5	Diskussion der Ergebnisse der Verfahren zur Routen- generierung	136
6	Skalierbare und repräsentative Funktionsvalidierung mit virtuellen Testfahrten	139
6.1	Bewertung des PCC-Featureumfangs mit Hilfe des RVT- Frameworks	140
6.2	Modellierung des SUT	145
6.2.1	Ziele und Randbedingungen bei MiL-Simulation	145

6.2.2	Längsdynamisches Modell für die MiL-Simulation . .	146
6.2.3	Exemplarische Verifikation des Modells	153
6.3	Wahl von Parametern und Ausführung des RVT-Frameworks zur PCC-Auslegung	160
6.4	Ergebnisse der PCC-Analyse	164
6.4.1	Evaluierungsmetrik Verfügbarkeit	164
6.4.2	Evaluierungsmetrik Erlebbarkeit	166
6.4.3	Evaluierungsmetrik Übernahmehäufigkeit	166
6.4.4	Regionsabhängige Auswertung der PCC-Metriken . .	168
6.5	Diskussion und Interpretation der Ergebnisse sowie Limitie- rungen	173
6.6	Integration der Validierung anhand der RVT in den etablierten Produktentwicklungsprozesses	176
7	Zusammenfassung und Ausblick	179
7.1	Zusammenfassung	179
7.2	Wissenschaftlicher Beitrag	182
7.3	Ausblick	183
A	Anhang	187
A.1	Empirische Bestimmung des Luftlinienfaktors	187
A.2	Parameter und Ergebnisse der Routengenerierung	189
A.3	Aufbereitung und Vorverarbeitung der SD-Kartendaten	191
A.4	Anwendung des RVT-Frameworks auf eine PCC in Westeuropa	193
	Abbildungsverzeichnis	197
	Tabellenverzeichnis	201
	Formelverzeichnis	203

Literaturverzeichnis	205
Betreute studentische Arbeiten	223
Eigene Publikationen	225

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

ACC	Adaptive Cruise Control
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
ADS	Automated Driving System
DDT	Dynamic Driving Task
DiL	Driver-in-the-Loop
DKM	Destinationskreis-Methode
DS	Data Scientist
FCD	Floating Car Data
FF	Forschungsfrage
FOT	Field Operational Test
FPD	Floating Phone Data
FSM	Fahrstreifenmarkierungen
GNSS	Global Navigation Satellite System
GRA	Geschwindigkeitsregelanlage
GT	Ground Truth
GZ	Gitterzelle
HD	High Definition
HiL	Hardware-in-the-Loop
HMI	Human Machine Interface
IMU	Inertial Measurement Unit
LCA	Lane Change Assist
LDWS	Lane Departure Warning System
LKW	Lastkraftwagen
LSA	Lichtsignalanlage
MiL	Model-in-the-Loop

MPC	Modellbasierte Prädiktive Regelung
MPP	Most Probable Path
MSE	Mean Squared Error
MWAE	Mean Weighted Absolute Error
NDS	Naturalistic Driving Study
O/D	Origin/Destination (Ursprung/Ziel)
ODD	Operational Design Domain
OEM	Original Equipment Manufacturer
PCC	Predictive Cruise Control
PKW	Personenkraftwagen
RGE	Routengenerierung
RVT	Repräsentative Virtuelle Testfahrt
SAE	Society of Automotive Engineers
SD	Standard Definition
SE	Systementwickler
SG	Setzgeschwindigkeit
SI	Simulationsingenieur
SiL	Software-in-the-Loop
SK	Straßenkategorie
SOP	Start of Produktion
SP	Straightest Path
SPICE	Software Process Improvement and Capability Determination
STO	Verfahren zur stochastischen Routengenerierung
SUT	System Under Test
SWE	Software Engineering
SYS	Systems Engineering
VG	Vorfahrt Gewähren
ViL	Vehicle-in-the-Loop
VR	Virtuelle Route
VZE	Verkehrszeichenerkennung
xFCD	extended Floating Car Data

1 Einleitung

1.1 Motivation

Das Bedürfnis nach Mobilität nimmt in unserer Gesellschaft seit mehreren hundert Jahren eine zentrale Stellung ein. Die Möglichkeiten zur Fortbewegung nehmen stetig zu und unterliegen aktuell einem Wandel mit bisher unbekannter Geschwindigkeit [122]. In der automobilen Mobilität kommt neben den Trends der Elektrifizierung und Konnektivität besonders der Automatisierung eine zentrale Rolle zu. Während für hochautomatisierte Funktionen (SAE¹ Level ≥ 3) eine Quote von über 50% unter den neuzugelassenen Fahrzeugen im Jahr 2030 erwartet wird, beginnt die flächendeckende Durchdringung mit Fahrerassistenzfunktionen schon jetzt [64]. Das automatisierte Fahren verspricht mehr Sicherheit und Energieeffizienz im Straßenverkehr bei gleichzeitig deutlich gesteigertem Komfort.

Durch die zunehmende Funktionalität automatisierter Systeme, steigen auch die Anforderungen der Nutzer, da die fehlerfreie Funktionalität der Systeme erwartet wird [28]. Die Markteinführung solcher automatisierter Fahrfunktionen setzt daher eine umfangreiche Entwicklungs- und vor allem Testphase voraus, in der der Sicherheitsnachweis der eingesetzten Technologie erbracht werden muss. Wachenfeld und Winner berechnen in einer Studie die theoretische Laufleistung von 6 Milliarden km im Realtest für die Freigabe eines AutobahnpiLOTen [118]. Daher beschäftigt sich ein Teil der Forschung zum automatisierten Fahren allein mit der Freigabethematik sowie neuen Methoden, die es ermöglichen, die notwendigen, aber ressourcenintensiven Tests in der Realwelt zu reduzieren.

¹ Society of Automotive Engineers

Wird noch einen Schritt weiter gegangen, so können die Anforderungen noch erweitert werden durch die Vorgabe von weichen Kriterien wie Komfort, Effizienz und Verfügbarkeit. Der Nutzer ist nicht zufrieden, wenn die Fahrfunktion zwar nachweislich weniger Unfälle verursacht, aber dafür im Regelfahrbetrieb häufig (z.B. nach zwei Minuten automatisierter Fahrt) abschaltet und die Fahraufgaben an den Fahrer übergeben möchte. Daher werden Methoden benötigt, die, den Sicherheitsnachweis vorausgesetzt, eine Bewertung des Nutzens für den Fahrer oder Insassen ermöglichen.

Dem Bedarf auf der einen Seite stehen die Herausforderungen bei der Durchführung der Bewertung gegenüber. Mit steigender Funktionalität nimmt auch die Vernetzung mehrerer Softwarekomponenten untereinander zu und somit die Abhängigkeiten voneinander. Als Beispiel sei die prädiktive Längsregelung genannt, die eine Vielzahl ganz unterschiedlicher Inputs voraussetzt und verarbeitet. Für die Umfeldrepräsentation werden Kartendaten, Kameradaten sowie Daten von Radar- und ggf. Lidarsensoren verwendet. Zur Positionierung in der Karte kommt noch die Abhängigkeit vom GNSS²-Signal hinzu. Ergänzt wird diese Umfeldrepräsentation durch Cloud-Services, die es erlauben, in Echtzeit Informationen über aktualisierte Geschwindigkeitsbegrenzungen oder den Reibwert der Fahrbahnoberfläche zur Verfügung zu stellen [2].

Zusätzlich benötigt die Fahrfunktion Einblicke in den Antriebsstrang, um einen optimalen Betriebsbereich der Aggregate zu ermöglichen und um sicherzustellen, dass die benötigte Antriebsleistung zur Verfügung steht. Für die fahrdynamische Regelung sind außerdem Bewegungsgrößen wie Beschleunigungen und die Gierrate von Relevanz. Diese große Zahl an Inputs wird noch erweitert durch die Konfigurierbarkeit seitens des Fahrers. Während der Testaufwand also durch die genannten Dimensionen zunimmt, werden die Zyklen für die Entwicklung von Software im Automobil zeitlich kürzer. Die Zahl physischer Erprobungsträger ist limitiert. Daher benötigen Fahrzeughersteller (OEM)³ neue Methoden, um zukünftige Generationen automatisierter Fahrfunktionen effizi-

² Globales Navigationssatellitensystem, engl. global navigation satellite system

³ Engl. original equipment manufacturer

ent zu validieren und um sicherzustellen, dass die Funktion beim Nutzer in allen auftretenden Betriebspunkten angemessen reagiert.

1.2 Zielsetzung der Dissertation

Ziel dieser Dissertation ist die Erforschung eines neuen Frameworks zur skalierbaren Validierung von Fahrfunktionen im Automobil anhand virtueller Testfahrten.

Die Bewertungsmethoden ermöglichen eine zielgerichtete Entwicklung der Funktionen und stellen sicher, dass die Nutzeranforderungen berücksichtigt und im Rahmen des Freigabeprozesses eingehalten werden. Zudem sollen die Methoden ermöglichen, weitere funktionale Potenziale zu identifizieren und den Mehrwert für den Nutzer abzuschätzen. Durch die Anwendung der Methoden auf aktuell in der Entwicklung befindliche Fahrfunktionen soll ein Nachweis für das Bewertungskonzept erbracht werden.

Der Schwerpunkt der Dissertation soll dabei auf skalierbaren Methoden liegen, die es erlauben, ganzheitliche Aussagen zur Performance der Funktion zu tätigen. Das bedeutet, dass regionsspezifische Besonderheiten in der Infrastruktur bei der Funktionsbewertung Berücksichtigung finden. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass über die Bewertungsmethoden auch länderspezifische Freigaben möglich werden.

Zur Erforschung der Bewertungsmethoden werden drei Forschungsfragen (FF) formuliert, die im Rahmen der Dissertation beantwortet werden. Ansatz für die skalierbare Validierung ist die Verwendung von Datenquellen, die global für alle Einsatzszenarien der Fahrfunktion existieren. Dazu gehören Kartendaten sowie Verkehrsschwarmdaten, die flächendeckend für nahezu alle Straßenabschnitte in Westeuropa vorliegen.

Anhand der Erkenntnisse aus der Beantwortung der FF1 (vgl. 4.6) leitet sich die Notwendigkeit der FF2 ab. Die Beantwortung von FF2 (vgl. 5.3.5) ist wiederum Voraussetzung für die Bearbeitung von FF3.

1. **FF1:** Wie sieht eine Methode zur skalierbaren und repräsentativen Funktionsvalidierung aus und welche Einschränkungen müssen dafür gegebenenfalls in Kauf genommen werden?
2. **FF2:** Welche Verfahren zur Generierung virtueller Testfahrtrouten existieren und wie können diese hinsichtlich der Nutzbarkeit bei der Funktionsvalidierung bewertet werden?
3. **FF3:** Welche Methoden können herangezogen werden, um den Betriebsbereich (ODD) einer Fahrfunktion zu quantifizieren und wie kann dies auf prädiktive Fahrfunktionen angewendet werden?

1.3 Umfeld

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Forschungstätigkeit bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG als externer Doktorand in Kooperation mit dem Institut für Technik der Informationsverarbeitung am Karlsruher Institut für Technologie. Parallel zur Promotionszeit wurde dort eine prädiktive Fahrzeuglängsführung⁴ (PCC) als Serienfunktion bis zur Markteinführung entwickelt, sodass die Möglichkeit bestand, das erforschte Framework direkt in der praktischen Anwendung zu validieren. Daher basieren insbesondere die Kapitel 5 und 6, in denen das Framework exemplarisch validiert wird, auf dem Anwendungsfall einer PCC.

1.4 Aufbau

Die Dissertation gliedert sich in sieben aufeinander aufbauender Kapiteln (s. Abb. 1.1). Nach der Einleitung folgen zwei Kapitel, in denen die für das Verständnis notwendigen technischen Grundlagen, die Begriffskonventionen und eine Aufbereitung des aktuellen Stands der Wissenschaft und Technik zur Validierung automatisierter Fahrfunktionen zusammengefasst werden. In dem

⁴ Engl. predictive cruise control

Kontext wird auch bereits die PCC in ihrer Funktionsweise und den daraus resultierenden Besonderheiten vorgestellt.

Für den ermittelten Forschungsbedarf werden in Kapitel 4 die notwendigen Anforderungen und die daraus abgeleiteten Konzeptideen vorgestellt bzw. verglichen. Der Konzeptnachweis für eine Methode zur Routengenerierung sowie ein Framework zur Funktionsvalidierung wird in den Kapiteln 5 und 6 durch die Anwendung auf eine PCC erbracht. Die Dissertation schließt mit einem Ausblick und der Zusammenfassung ab (vgl. Kapitel 7).

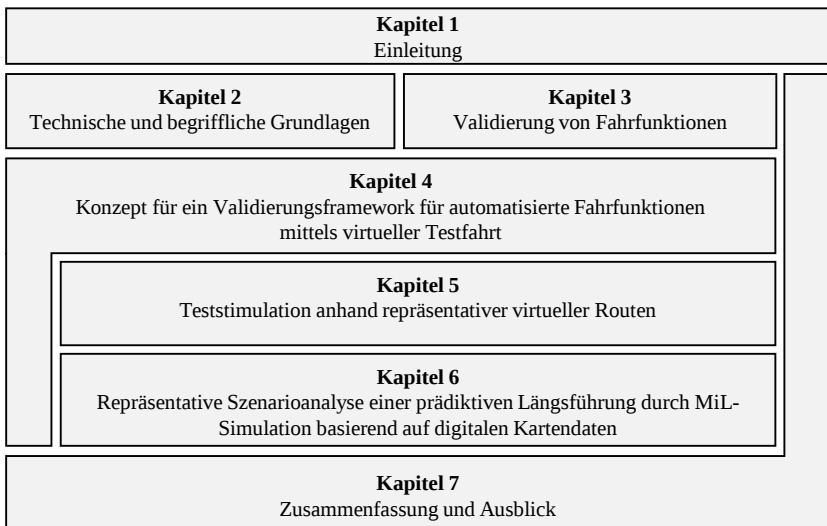


Abbildung 1.1: Aufbau der Dissertation

2 Technische und begriffliche Grundlagen

2.1 Fahraufgabe

Automatisierte Fahrfunktionen (vgl. 2.2) in PKW¹ und LKW² haben das Ziel, den Fahrer zu unterstützen, indem das automatisierte System (vgl. 2.2) einzelne Teile der Fahraufgabe oder die komplette Fahraufgabe übernimmt. Nach dem Drei-Ebenen-Modell von Donges [27] kann die Fahraufgabe in die Navigationsebene, Bahnführungsebene und Stabilisierungsebene unterteilt werden (s. Abb. 2.1). Auf der obersten, strategischen Ebene wird die Navigation ausgeführt, die in einer Route und einer Abfahrtszeit resultiert. Die gegebene Route wird in der darunterliegenden Bahnführungsebene als Eingang verwendet, um die Solltrajektorie taktisch zu definieren. Auf der untersten Ebene (Stabilisierungsebene) wird die Solltrajektorie mit Zugriff auf die Fahrzeugaktorik (vgl. 2.2.3) regelungstechnisch umgesetzt.

Definition 2.1 (Trajektorie, Geschwindigkeitstrajektorie). Im physikalischen Sinne ist der Begriff Trajektorie synonym zu der Bahnkurve eines Objekts zu verstehen. Im Kontext des automatisierten Fahrens beschreibt die Trajektorie die zeitliche Abfolge der Position eines Objekts, wie bspw. des Ego-Fahrzeugs. Die Angabe der Position kann in unterschiedlichen Formen erfolgen (bspw. als relative/absolute Koordinaten oder als kumulierte Distanz zum Startpunkt). Im Falle einer Geschwindigkeitstrajektorie wird zusätzlich die jeweils zu einer Position gehörige Objektgeschwindigkeit definiert.

Definition 2.2 (Ego-Fahrzeug). Die Bezeichnung Ego-Fahrzeug dient der Differenzierung zwischen Fahrzeugen, falls in einer Szene mehrere Fahrzeuge

¹ Personenkraftwagen

² Lastkraftwagen

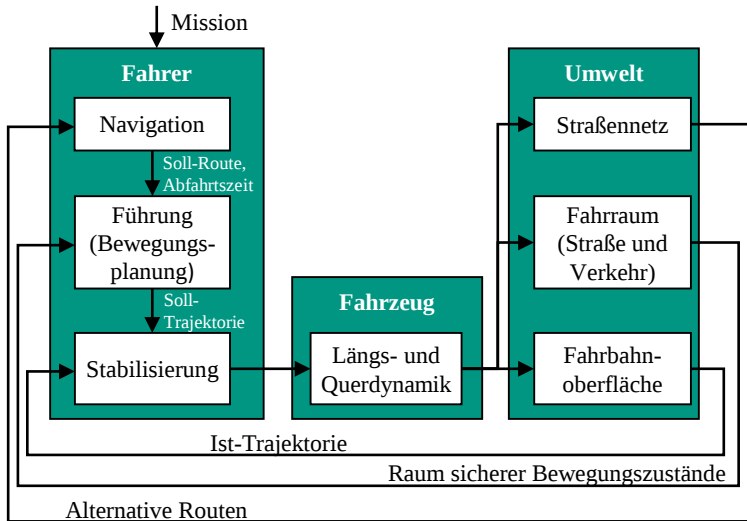


Abbildung 2.1: Drei-Ebenen-Modell nach [27]

existieren. Von den sich im Straßenverkehr befindlichen, beweglichen Objekten ist das Ego-Fahrzeug jeweils das Fahrzeug, das im Mittelpunkt der Analyse steht. Im Kontext des automatisierten Fahrens ist das Ego-Fahrzeug mit der zu untersuchenden automatisierten Fahrfunktion ausgestattet.

Definition 2.3 (Umwelt). Als Umwelt sei die Umgebung des Fahrzeugs, das mit dem SUT ausgestattet ist, definiert. Die Umwelt beinhaltet u.a. das Straßennetz, (Verkehrs-)objekte und Witterungsbedingungen, die einen Einfluss auf das Ego-Fahrzeug besitzen (vgl. 2.4).

In der SAE Norm J3016 wird ähnlich wie im Drei-Ebenen-Modell von Don-ges ebenfalls eine Dreiteilung der Fahraufgabe in strategische, taktische und operative Funktionen vorgenommen. Für automatisierte Fahrfunktionen wird allerdings die strategische Ebene nicht betrachtet, sodass mit dieser Einschränkung die dynamische Fahraufgabe³ (DDT) definiert wird. Diese umfasst alle

³ Engl. dynamic driving task

operativen und taktischen Funktionen, die notwendig sind, um ein Fahrzeug in Echtzeit im Straßenverkehr zu betreiben. Dazu zählen die Längs- und Querführung des Fahrzeugs, das Überwachen der Umgebung des Fahrzeugs und die Reaktion darauf, die taktische Manöverplanung sowie das Mitteilen von Absichten beispielsweise durch Blinken. Nicht Teil der dynamischen Fahraufgabe hingegen sind strategische Funktionen, die nicht zwangsweise während der Fahrt stattfinden müssen, wie die Auswahl des Fahrtziels, der Abfahrtszeit sowie möglicher Wegpunkte [93].

Bubb [19] hingegen teilt die Fahraufgabe nach den Bedienhandlungen des Fahrers ein und definiert dazu primäre, sekundäre und tertiäre Fahraufgaben. Zu den primären Fahraufgaben wird in diesem Zusammenhang die eigentliche Fahrzeugführung inklusive der Navigation, der Trajektorienwahl sowie der Stabilisierung gezählt. Aufgaben, die dem Einstellen des Betriebspunkts des Fahrzeugs dienen, fallen in die sekundären Fahraufgaben. Dazu gehören beispielsweise das Schalten der Getriebestufe, das Blinken sowie die Licht- und Scheibenwischersteuerung. Die tertiären Aufgaben umfassen die Steuerung des Ambientes und sind somit den Bereichen Komfort und Infotainment zuzuordnen [83].

In dieser Arbeit wird der Begriff Fahraufgabe als Schnittmenge der Subaufgaben aus der Definition der DDT nach SAE J3016 und der primären Fahraufgabe nach Bubb festgelegt. Das bedeutet, dass die Fahraufgabe lediglich taktische und operative Aufgaben umfasst, welche durch die Beschränkung auf primäre Fahraufgaben die Bedienung des Fahrzeugs über das Lenken und Beschleunigen/Bremsen hinaus nicht beinhaltet.

Definition 2.4 (Fahraufgabe). Die Fahraufgabe umfasst die taktischen (Bewegungsplanung) sowie operativen (Lenken, Beschleunigen und Bremsen) Aufgaben der Fahrzeugführung und dafür gegebenenfalls notwendige Vorverarbeitungsschritte (z.B. Umfelderkennung).

2.2 Fahrerassistenzsysteme und Automatisierte Fahrsysteme

Je nach Automatisierungsgrad können Fahrerassistenzsysteme⁴ (ADAS) und Automatisierte Fahrsysteme⁵ (ADS) die DDT teilweise oder vollständig übernehmen. Der Begriff ADAS wird jedoch für eine Vielzahl von Systemen verwendet, die den Fahrer unterstützen, sodass hier eine präzisere Definition notwendig ist. Generell können ADAS je nach Wirkprinzip in die vier Kategorien der stabilisierenden, informierenden und warnenden, kurzzeitig aktiv eingreifenden sowie kontinuierlich eingreifenden Systeme eingeteilt werden. Stabilisierende Systeme unterstützen den Fahrer durch gezielte Motor- und Rad-individuelle Bremsengriffe, um den vom Fahrer vorgegebenen Sollkurs trotz wechselnder Fahrbahnoberflächenbeschaffenheit möglichst einzuregeln. Beispiele dafür sind die elektronische Stabilitätskontrolle (ESC) und das Antiblockiersystem (ABS). Informierende Systeme wie die Verkehrszeichenassistentz und warnende Systeme wie die Fahrstreifenverlassenswarnung⁶ (LDWS) überwachen die Umgebung des Fahrzeugs und warnen den Fahrer im Falle einer potenziell bevorstehenden gefährlichen Situation durch optische, haptische und akustische Hinweise [36].

Darüber hinaus gibt es kurzzeitig aktiv eingreifende Systeme wie die automatische Notbremsung⁷ (AEB), die den Fahrer bei Vorliegen einer bevorstehenden und nicht mehr abwendbaren Gefahrensituation durch einen aktiven Eingriff in die Lenkung oder Bremse unterstützen. Die letzte und für die Dissertation besonders relevante Kategorie beinhaltet Systeme, die kontinuierlich und aktiv die Längs- oder Querverführung des Fahrzeugs übernehmen, zu denen beispielsweise der Abstandsregeltempomat⁸ (ACC) sowie die aktive Fahrstreifenmittenführung gehören. Diese sogenannten „Komfortsysteme“ liegen im Fokus

⁴ Engl. advanced driver assistance systems

⁵ Engl. automated driving systems

⁶ Engl. lane departure warning system

⁷ Engl. automatic emergency brake

⁸ Engl. adaptive cruise control

dieser Dissertation und werden hier wegen der kontinuierlichen Übernahme der Fahraufgaben als Fahrfunktionen bezeichnet.

Definition 2.5 (Fahrfunktion). Eine Fahrfunktion ist ein automatisiertes System, das die DDT (oder Teile der DDT) durch die aktive Fahrzeugführung kontinuierlich übernimmt. Sie kann nach ihrem Automatisierungslevel sowie dem Betriebsbereich eingestuft werden.

2.2.1 Systematische Einordnung von Fahrfunktionen

Je nach Anwendungsfall unterscheiden sich Fahrfunktionen darin, in welchem Umfang die Fahraufgabe übernommen wird, in welchem Betriebsbereich die Funktion verfügbar ist und in der Frage, ob der Fahrer oder die Fahrfunktion die Verantwortung für die Fahraufgabe trägt. Für eine systematische Einordnung erfolgt in dieser Dissertation eine Einteilung der Fahrfunktionen nach dem Automatisierungslevel sowie der operativen Betriebsdomäne⁹ (ODD).

Automatisierungslevel

Eine wesentliche, aber dennoch nicht vollumfängliche Charakterisierung von Fahrfunktionen erfolgt durch das Automatisierungslevel. Nach der SAE International [93] wird zwischen sechs Leveln unterschieden, in denen jeweils die Rolle der automatisierten Fahrfunktion sowie die des Fahrers bzw. Nutzers beschrieben wird und Beispiele genannt werden. Eine ähnliche Klassifizierung nimmt die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) im Schlussbericht zu Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung vor [35]. Sie unterteilt den Automatisierungsgrad in fünf Stufen, zu denen neben einem Beispiel auch eine Beschreibung der Automatisierungsstufe sowie die Erwartung des Fahrers aufgeführt werden. Die dabei fehlende sechste Stufe beschreibt das fahrerlose Fahren. Da beide Beschreibungen hinsichtlich der drei Kriterien (1) Ausführung von Längs- und Querverführung, (2) Überwachung der Fahrum-

⁹ Engl. operational design domain

SAE Level	SAE Name	Ausführung von Längs- und Querführung	Rückfall-ebene	Verfügbarkeit	
0	keine Automatisierung	Fahrer	Fahrer	nicht vorhanden	Fahrer überwacht die Fahrumgebung
1	Assistiert	Fahrer und System	Fahrer	begrenzt	
2	Teil-automatisiert	System	Fahrer	begrenzt	
3	Bedingt automatisiert	System	Fahrer	begrenzt	System überwacht die Fahrumgebung
4	Hoch-automatisiert	System	System	begrenzt	
5	Voll-automatisiert	System	System	unbegrenzt	

Abbildung 2.2: Automatisierungslevel nach SAE J3016TM [93]

gebung und (3) Rückfallebene weitestgehend gleich sind, wird in dieser Dissertation nur auf eine der beiden Nomenklaturen zurückgegriffen. Da die SAE bereits alle sechs Automatisierungsstufen abdeckt, soll diese als Referenz in der Dissertation verwendet und anhand von Abb. 2.2 erläutert werden.

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die einzelnen Automatisierungsstufen nach [93] gegeben, um die Unterschiede zwischen den Stufen herauszustellen. Beim Fahren mit SAE Level 0 (keine Automatisierung) wird die komplette Fahraufgabe (vgl. 2.1) durch den menschlichen Fahrer ausgeführt. Lediglich kurzzeitige Unterstützungen durch Warn- und Sicherheitsfunktionen sind hier möglich.

Auf SAE Level 1 (assistiertes Fahren) hingegen übernimmt eine Fahrfunktion zeitweise entweder die Längs- oder Querführung, allerdings nicht beide gleichzeitig. Im Gegensatz zu Level 0 greift die Fahrfunktion nicht nur kurzzeitig ins Fahrgeschehen ein, sondern ist potenziell in der Lage, für eine längere Zeit die jeweilige Aufgabe zu übernehmen. Der Fahrer übernimmt die jeweils andere

Aufgabe der Längs- oder Querverführung und ist in der Verantwortung, das System zu überwachen sowie bei Bedarf die Fahraufgabe vollständig zu übernehmen. Beispiele für diese Automatisierungsstufe sind ein konventioneller ACC (Längsverführung) oder eine aktive Fahrstreifenmittenführung (Querverführung).

Werden zeitweise gleichzeitig die Längs- und Querverführung von Fahrfunktionen übernommen, führt dies nach SAE zur Einstufung auf Level 2 (teilautomatisiertes Fahren). Im Gegensatz zu höheren Automatisierungsstufen fungiert der Fahrer allerdings noch als überwachendes und notfalls eingreifendes Element. Da die Automatisierung nicht durchgängig erfolgen muss (begrenzte Verfügbarkeit entlang der Route), ist der Fahrer ebenfalls Rückfallebene für die Übernahme beider Aufgaben.

Von Level 2 zu 3 (bedingt automatisiertes Fahren) erfolgt die wesentliche Änderung, dass nun das System selbstständig in der Lage sein muss, die Fahraufgabe in definierten ODDs (vgl. 2.2.1) vollständig auszuführen und diese auch zu überwachen. Der Fahrer muss bereit sein, auf Übernahmeaufforderungen des Systems zu reagieren. Er muss also nicht mehr die korrekte Funktionsweise des Fahrzeugs und der Fahrfunktion sowie das Fahrzeugumfeld überwachen, sondern lediglich auf eventuelle Mitteilungen der Fahrfunktion achten und daraufhin die Fahrzeugführung übernehmen.

Auf Level 4 (hochautomatisiertes Fahren) muss die Fahrfunktion zusätzlich in der Lage sein, auf das erkannte Erreichen einer Systemgrenze zu reagieren und das Fahrzeug ohne Unterstützung durch den Fahrer in einen sicheren Zustand zu bringen. Die auf dieser Stufe noch fehlende durchgängige Verfügbarkeit der Automatisierung vom Start bis zum Ziel der Route (bedeutet eine unbegrenzte Verfügbarkeit) ist auf Level 5 (vollautomatisiertes Fahren) gegeben. Dadurch ist es möglich, dass das Fahrzeug auch ohne Fahrer bewegt werden kann. Die Fahrfunktion führt also dauerhaft die Längs- sowie Querverführung aus, überwacht die Systemgrenzen und stellt notfalls selber eine Rückfallebene zur Verfügung.

Betriebsbereich (ODD)

Während die Automatisierungsstufen einen Überblick über die rechtliche Verantwortung und die prinzipielle Aufteilung der Fahraufgaben geben, fehlt eine Systematik, die orthogonal zu den Automatisierungsstufen eine Quantifizierung der übernommenen Fahraufgaben und somit der Verfügbarkeit der Fahrfunktion vornimmt (siehe Beispiel in Abb. 2.15). In der SAE J3016 wird dieser Sachverhalt durch die dort definierte ODD beschrieben [93].

Definition 2.6 (Betriebsbereich (ODD)). Die ODD beschreibt die Betriebsbedingungen, für die eine gegebene Fahrfunktion (SAE Level 1-5) oder ein Funktionsfeature entwickelt wird und funktionsbereit sein sollte. Erkennt die Fahrfunktion selbstständig das Verlassen der ODD wird in dieser Dissertation von einer erkennbaren ODD gesprochen (zwingend notwendig für SAE Level ≥ 3). Wird das Verlassen der ODD nicht durch die Fahrfunktion detektiert, wird dies als nicht (vollständig) erkennbare ODD bezeichnet (oft der Fall bei Fahrfunktionen mit SAE Level < 3).

Für alle Stufen außer Level 5 sind die Fahrfunktionen durch eine potenziell begrenzte ODD limitiert (vgl. 2.2). Dadurch, dass die ODD von Fahrfunktionen individuell stark variiert und diese schwer objektiv und systematisch darstellbar ist, wird in der Standardisierung nach SAE [93] keine konkrete Aufteilung der einzelnen Automatisierungsstufen hinsichtlich des Betriebsbereichs durchgeführt.

Gerade diese Quantifizierung der ODD stellt aber ein entscheidendes Auslegungskriterium für Fahrfunktionen dar. Eine Fahrfunktion auf niedrigerem Automatisierungslevel, aber mit umfangreicherer ODD kann den Fahrer unter Umständen stärker entlasten als eine Funktion mit höherem Automatisierungslevel aber mit stark reduzierter ODD.

Zu diesen Betriebsbedingungen gehören unter anderem die Fahrgeschwindigkeit, Straßentypen, Umwelteinflüsse, wie Wetter- und Lichtbedingungen, geo-

grafische Restriktionen¹⁰, tageszeitabhängige Faktoren, Verkehrseinflüsse sowie bestimmte Straßenattribute [93]. Abbildung 2.3 zeigt dazu eine exemplarische Auflistung von Elementen aus der Kategorie *Straßennetz*, anhand derer die ODD definiert werden kann.

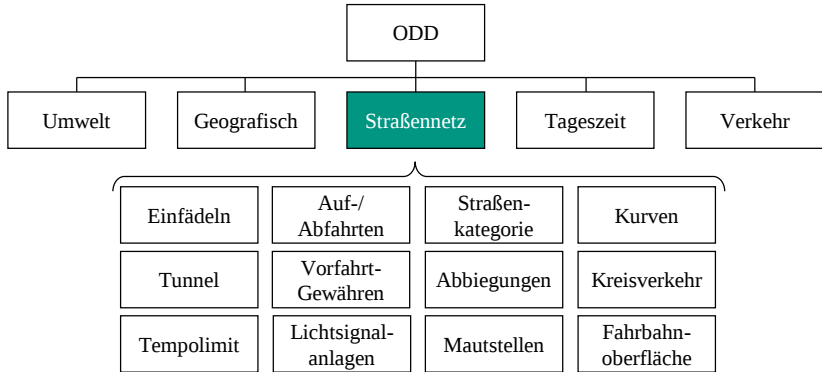


Abbildung 2.3: Beispielhafte hierarchische Gliederung von Elementen zur Definition der ODD

Im Allgemeinen sind Fahrfunktionen, die einen nennenswerten Funktionsanteil unter Nutzung von Kartendaten realisieren, meistens auch vom Vorhandensein von Kartendaten abhängig. Auf Streckenabschnitten, für die keine Kartendaten vorliegen, ist die Fahrfunktion somit in der Regel auch nicht verfügbar. Auf der anderen Seite wird die ODD durch den Umfang implementierter Funktionsfeatures (vgl. 2.2.2) begrenzt. Besitzt eine Fahrfunktion beispielsweise kein Feature, um Kreisverkehre selbstständig zu bewältigen, sind Kreisverkehre nicht Teil der ODD.

Für eine weitergehende Lektüre zu den Begrifflichkeiten in einem Weltmodell für den Betrieb von automatisierten Fahrfunktionen wird auf die vertiefende

¹⁰ Ein Beispiel für eine geografische Restriktion mit gleichzeitiger Einschränkung des Straßentyps stellt die Level 2 Fahrfunktion Super Cruise im Cadillac CT6 dar. Sie ist nur in den USA auf einem Teil aller Straßen mit Auf- und Abfahrten verfügbar, die vom Hersteller General Motors bereits kartiert wurden [74] (Stand 07.2020).

Literatur [24] [25] verwiesen, in der eine systematische Ontologie für das nord-amerikanische Straßennetz eingeführt wird. Der erste Teil konzentriert sich auf die Straßenstruktur und beinhaltet unter anderem eine Systematik für den Straßentyp und die Fahrbahnoberfläche, die Straßengeometrie, die Gestaltung von Kreuzungen und weitere Straßenattribute. Im zweiten Teil wird auf die unterschiedlichen Straßennutzer, Tiere, andere Hindernisse sowie auf Umweltbedingungen eingegangen. Diese Definitionen unterstützen eine einheitliche Beschreibung der ODD von Fahrfunktionen und ermöglichen somit die Vergleichbarkeit von Fahrfunktionen hinsichtlich ihrer ODD.

2.2.2 Featureumfang von Fahrfunktionen

Definition 2.7 (Feature). Ein Feature einer Fahrfunktion ist ein für den Nutzer erlebbarer Funktionsbestandteil, der in bestimmten Situationen eine zusätzliche Funktionalität ermöglicht.

Im Falle einer längsregelnden Fahrfunktion ist ein potenzielles Feature das adaptive Regeln der Fahrzeuggeschwindigkeit in Abhängigkeit des Verhaltens eines vorausfahrenden Fahrzeugs. Ein weiteres Beispiel ist das vorausschauende Anpassen der Fahrgeschwindigkeit auf Basis von Karteninformationen, wenn sich das Fahrzeug einem niedrigeren Tempolimit nähert.

Je umfangreicher also das Set an funktionalen Features ist, desto größer ist auch die ODD (vgl. 2.2.1) und desto seltener muss der Fahrer die Fahraufgabe anteilig oder vollständig übernehmen. Unter der Annahme, dass es das Ziel ist, den Fahrer möglichst stark zu entlasten, gilt es also, die Features mit einem günstigen Kosten/Nutzen-Verhältnis zu identifizieren. Das bedeutet, dass die Kosten für die Entwicklung und die Freigabe eines neuen Features in positivem Verhältnis zu dem Mehrwert stehen sollten, den das Feature dem Fahrer in Form einer erhöhten ODD bietet.

2.2.3 Logische Architektur

Die Architektur eines Softwaresystems beschreibt laut ISO 42010 [49] die fundamentalen Konzepte oder Eigenschaften des Systems in seiner Umgebung anhand des Aufbaus, seiner Komponenten sowie der Beziehungen untereinander. Darüber hinaus wird im Automotive-Bereich zwischen logischen und technischen Systemarchitekturen unterschieden. Die logische Systemarchitektur ergibt sich aus einer abstrakten Sicht auf die Komponenten des Fahrzeugs sowie auf den Fahrer und die Umwelt, während die technische Systemarchitektur eine konkretere Sicht mit Bezug auf die Realisierung beinhaltet [95]. In diesem Kapitel ist zunächst die abstraktere Betrachtung im Zuge der logischen Softwarearchitektur zweckmäßig, da die konkrete technische Realisierung nicht relevant ist. Daher ist im Folgenden mit dem allgemeinen Begriff Architektur die logische Architektur gemeint.

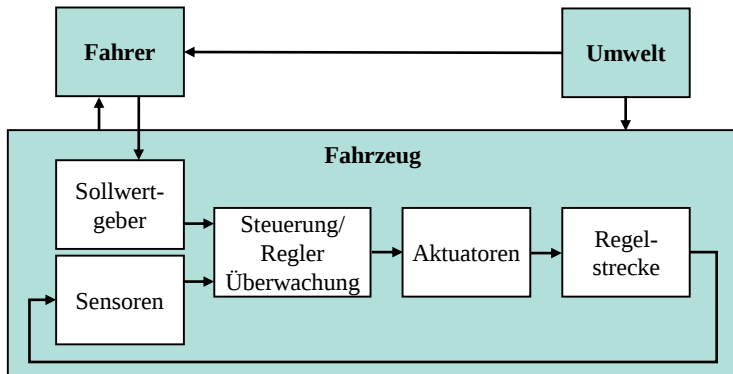


Abbildung 2.4: Logische Systemarchitektur für Regelungssysteme im Fahrzeug (nach [95] und [3])

Im weiteren Sinne kann eine Fahrfunktion als regelungstechnisches System aufgefasst werden, welches aus den Komponenten Fahrer, Umwelt und Fahrzeug besteht (s. Abb. 2.4). Im Fahrzeug wiederum ist der Regler verortet, der den vom Fahrer beeinflussten Sollwert mit dem aktuellen Istwert aus der Sen-

sorik abgleicht und eine Stellgröße an den Aktuator liefert.

Während der Fahrzeugentwicklung werden Modelle genutzt, um Systemverhalten zu beschreiben und zu analysieren. Wegen dieses vorhandenen Modellwissens, werden insbesondere für planende Fahrfunktionen häufig modellbasierte prädiktive Regelungen¹¹ (MPC) als Regler eingesetzt.

Definition 2.8 (Modellbasierte Prädiktive Regelung). Bei der MPC wird vorhandenes Modellwissen über einen dynamischen Prozess zur Prädiktion des zukünftigen Verhaltens der Regelstrecke im Rahmen der Regelung herangezogen. Die Qualität der Modellierung wirkt sich somit direkt auf die Güte der Regelung aus. Im Idealfall wird das Systemverhalten exakt präzisiert, sodass keine Regelung sondern lediglich eine Steuerung zur Umsetzung der Steuergrößen ausreicht [26].

Die generelle Architektur bietet die Ausgangsbasis und wird für die Anwendung von Fahrfunktionen an einigen Stellen angepasst bzw. ergänzt. Im Gegensatz zu klassischen regelungstechnischen Anwendungen liegt der algorithmische Fokus bei Fahrfunktionen primär auf der Wahrnehmung (Sensoren) und der Bewegungsplanung (Sollwertgeber) und weniger auf den restlichen Komponenten. In der Literatur existieren eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze für Systemarchitekturen für automatisierte Fahrfunktionen, die sich oft durch den thematischen Schwerpunkt auf entweder die Sensorik oder die Planung unterscheiden.

Im Kontext von Architekturen für Fahrfunktionen wird oft die Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe aufgegriffen, die sich auf Navigation, Führung und Stabilisierung aufteilen lässt (vgl. 2.1). Damit der Fahrer die Aufgabe der Navigation ausführen kann, reicht eine abstrakte Repräsentation der Umwelt in Form des Straßennetzes. Mit einer gewählten Fahrtroute ergibt sich die Führungsaufgabe mit dem Ziel, die Führungsgrößen für die Längs- und Querbewegung zu definieren. Dafür benötigt der Fahrer eine weniger abstrakte Umweltprepräsentation, die auch den Fahrraum sowie andere Verkehrsteilnehmer

¹¹ Engl. model predictive control

umfasst. Auf der unteren Ebene, auf der die Stabilisierung erfolgt, interagiert das Fahrzeug physikalisch entsprechend seiner Längs- und Querdynamik und unter Berücksichtigung von äußeren Störungen mit der Fahrbahnoberfläche. Die Aufteilung in unterschiedliche Abstraktionslevel ermöglicht einerseits, für den jeweiligen Anwendungsfall effektive Umgebungsrepräsentationen zur Verfügung zu stellen und andererseits eine Unterteilung der Fahraufgabe. Die drei Ebenen für die Modellierung des menschlichen Fahrens übernimmt unter anderem Matthaei [63], um die Architektur von automatisierten Fahrfunktionen zu definieren. Der Fokus liegt bei Matthaei auf der detaillierten Darstellung der Wahrnehmung, die in die drei Bereiche externe Daten, Umgebungswahrnehmung und Selbstwahrnehmung aufgeteilt wird. Jeder dieser Bereiche lässt sich in drei hierarchische Abstraktionsgrade aufteilen, die weitestgehend den drei Ebenen von Donges entsprechen. Auf oberster Ebene wird die Umgebung auf Straßenebene modelliert, die in der Routenplanung Anwendung findet. Auf der mittleren Ebene findet eine Abstraktion der Umgebung auf die einzelnen Fahrstreifen statt, während auf der untersten Ebene die Umgebung quasi-kontinuierlich modelliert wird.

Die Umgebungsmodelle werden auf den drei Abstraktionsebenen als Input für die Erfüllung der Mission (Planung und Regelung) zur Verfügung gestellt, welche als strategisch, taktisch und operativ bezeichnet werden. Während auf der taktischen Ebene mit der Manöverplanung eine Steuerung (open loop control) stattfindet, ist auf der operativen Ebene eine Trajektoriengenerierung mit Rückführung (closed loop control) umgesetzt. Die Architektur von Matthaei wird von Schuldt [100] aufgegriffen und auf den einzelnen Ebenen zusätzlich detailliert. Die Ansätze von Matthaei und Schuldt zeichnen sich durch eine präzise Abbildung der unterschiedlichen Abstraktionslevel der Eingangsdaten in der Wahrnehmung aus. Im Bereich der Planung hingegen wird vor allem auf der untersten, operativen Ebene nicht detailliert modelliert.

Wird der Fokus innerhalb der Architektur weniger auf die Wahrnehmung und mehr auf die Planung und Regelung gelegt, wird oft das Paradigma „Sense – plan – act“ aus der Regelungstechnik und Robotik verwendet [105], das

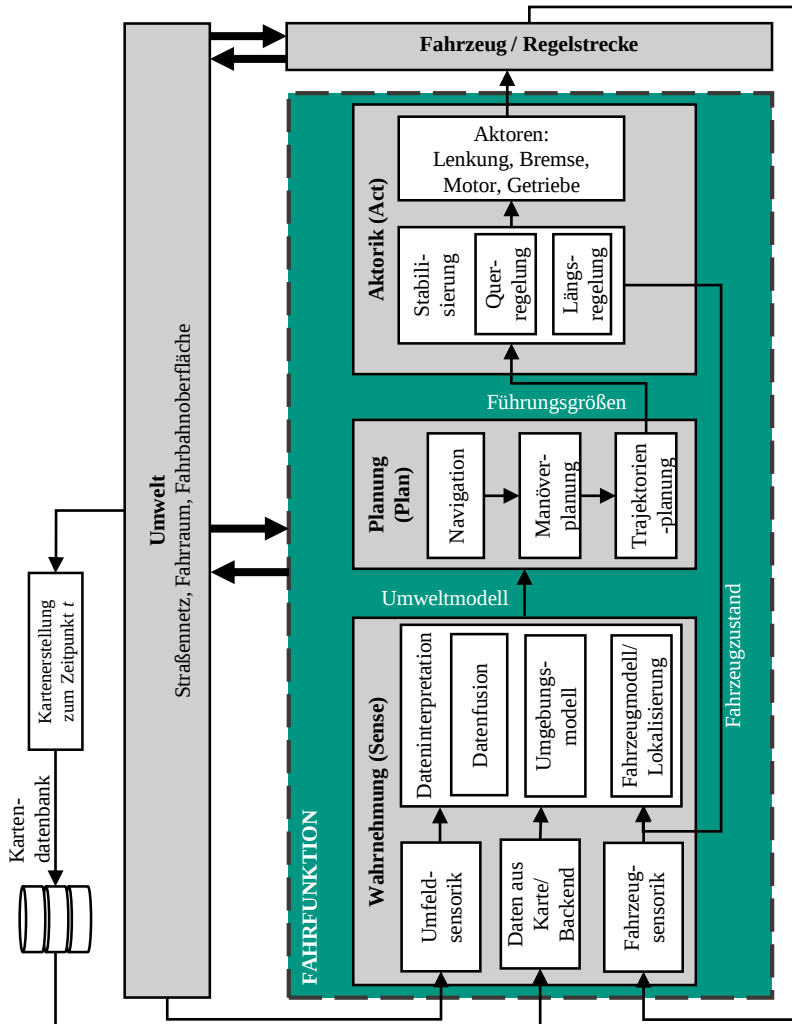


Abbildung 2.5: Angepasstes Architekturschaubild nach [1] und ergänzt durch [27]

auch Grundlage für die Architektur von Abdulkhaleq et al. [1] bildet. Im Rahmen dieser Dissertation wird auf die Architektur von Abdulkhaleq et al. [1] zurückgegriffen und diese an einigen Stellen modifiziert (s. Abb. 2.5). Der Planungsteil wird dazu in die Ebenen Navigation, Manöverplanung und Trajektorienplanung unterteilt. Die Stabilisierung bestehend aus der Längs- und Querregelung ist in der Aktorik verortet.

Ein Teil der Wahrnehmung wird über Kartendaten abgedeckt. Diese entsprechen einer Repräsentation der Umwelt zum Zeitpunkt der Kartenerstellung (vgl. 2.5). In Anlehnung an die Drei-Ebenen-Hierarchie von Donges (vgl. 2.1) wird die Umwelt im Schaubild mit ihren drei Abstraktionsebenen dargestellt, die in dieser Form auch in den Kartendaten abgebildet sind.

Die Fahrzeugsensorik liefert Informationen über den aktuellen Zustand des Ego-Fahrzeugs. Dazu gehören Bewegungsgrößen wie Geschwindigkeiten und Beschleunigungen, die absolute Position basierend auf einer GNSS-Lokalisierung sowie Informationen über Zustände des Fahrzeugantriebsstranges und Fahrwerk, wie Drehzahlen, Lenkwinkel und die aktuelle Getriebeübersetzung (Gang). Die Umfeldsensorik erfasst die aktuelle, unmittelbare Umgebung des Fahrzeugs, die im Rahmen der Daten-Interpretation mit der Fahrzeugsensorik und den zu dem jeweiligen Streckenabschnitt gehörigen Kartendaten im Rahmen der Daten-Interpretation zu einem Umweltmodell fusioniert werden. Dieses Umweltmodell ist Ausgangspunkt für die mehrschichtige Verhaltensplanung im Planungsschritt.

Die Darstellung dieser angenommenen Architektur soll dabei unterstützen, die in den folgenden Kapiteln herangezogenen Randbedingungen und Annahmen für die Validierung von Fahrfunktionen besser nachzuvollziehen.

2.3 Der Softwareentwicklungsprozess in der Automobilindustrie

Im Gegensatz zu vielen anderen elektronischen Produkten, wie z.B. Smartphones, wird die Softwareentwicklung im Automobil nach wie vor stark durch

den Produktentwicklungsprozess des physischen Fahrzeugs beeinflusst. Die Abhängigkeit von Sensoren mit sehr spezifischen Charakteristika und von sich ständig weiterentwickelnden Fahrzeugelektronik-Architekturen erschwert eine fahrzeugunabhängige Entwicklung von Fahrfunktionen. Um die Anwendungsmöglichkeiten der in dieser Dissertation entwickelten Methoden besser einordnen zu können, wird im Folgenden sowohl der Produktentwicklungsprozess eines Fahrzeugprojektes, als auch ein Modell für den Softwareentwicklungsprozess im Automobil vorgestellt.

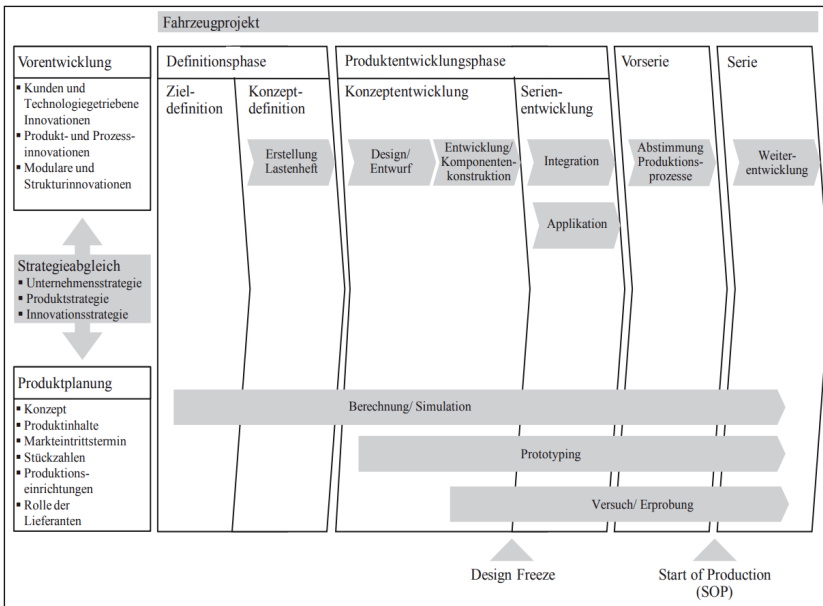


Abbildung 2.6: Modell des Produktentwicklungsprozesses in der Automobilindustrie [99]

Das mehrphasige Fahrzeugprojekt beginnt nach Abschluss der Vorentwicklung mit der Ziel- sowie der Konzeptdefinition, die mit einem Lastenheft beendet wird (s. Abb. 2.6). Während der nachfolgenden Produktentwicklungsphase werden die ersten physischen Prototypen erstellt und erste Erprobungen durch-

geführt. Mit Abschluss der Serienentwicklung werden in der Vorserie die Produktionsprozesse final abgestimmt und das Produkt über virtuelle und reale Erprobungen bis zur Freigabe, den Beginn der Produktion und schließlich die Auslieferung der Fahrzeuge an den Kunden weiter abgesichert [99].

Als Teil des Fahrzeugprojekts wird die Softwareentwicklung durchgeführt. In der automobilen Softwareentwicklung wird häufig das V-Modell als Prozessreferenz herangezogen [77] [108], welches ähnliche chronologische Phasen wie der Produktentstehungsprozess (vgl. 2.6) referenziert, aber zusätzlich noch unterschiedliche Abstraktionsgrade des System berücksichtigt. Darüber hinaus existieren eine Reihe weiterer Modelle [3], wie das Wasserfallmodell [45], das Spiralmodell [16] und das State-Gate-Modell [23], auf die hier im Detail nicht eingegangen wird.

Das V-Modell ist ein Vorgehensmodell zur Entwicklung von Softwaresystemen, das ursprünglich 1992 von der Bundeswehr erstmals veröffentlicht wurde. Es wurde zum V-Modell 97 und im Jahr 2005 schließlich zum V-Modell XT weiterentwickelt. Das Modell gibt Ergebnisse und Abläufe des Prozesses in mehreren Schritten vor und ermöglicht dadurch eine effiziente Zusammenarbeit zwischen Auftraggeber und Auftragnehmern [50].

Kern des V-Modells stellt die Systemerstellung dar, die eingebettet wird in Referenzen für das zugehörige Projektmanagement (PM), die Qualitätssicherung (QS) sowie das Konfigurationsmanagement (KM). Der Prozess definiert sich über die Beschreibung von Produkten, Rollen und Aktivitäten. Das V-Modell ist ein strukturiertes und sequenzielles Vorgehensmodell, welches in horizontaler Richtung den chronologischen Fortschritt abbildet und in vertikaler Richtung den Abstraktionsgrad der Systembetrachtung wiedergibt. Durch die abstrakte Systembetrachtung zu Beginn und zum Ende des Projekts und die detaillierte Komponentenbetrachtung in der Mitte des Projekts ergibt sich die namensgebende V-Form [50].

Die einzelnen Phasen des V-Modells sollen anhand der Bezeichnungen des

Automotive-SPICE¹² Prozessreferenz- und Prozessbewertungsmodells erklärt werden. Automotive-SPICE dient der Bewertung der Prozesse zur Entwicklung von in Fahrzeugen eingebetteten Systemen und Software [37]. Es wurde von der Automotive Special Interest Group entwickelt und wird vom Arbeitskreis 13 des Qualitätsmanagement-Centers des VDA¹³ weiterentwickelt.

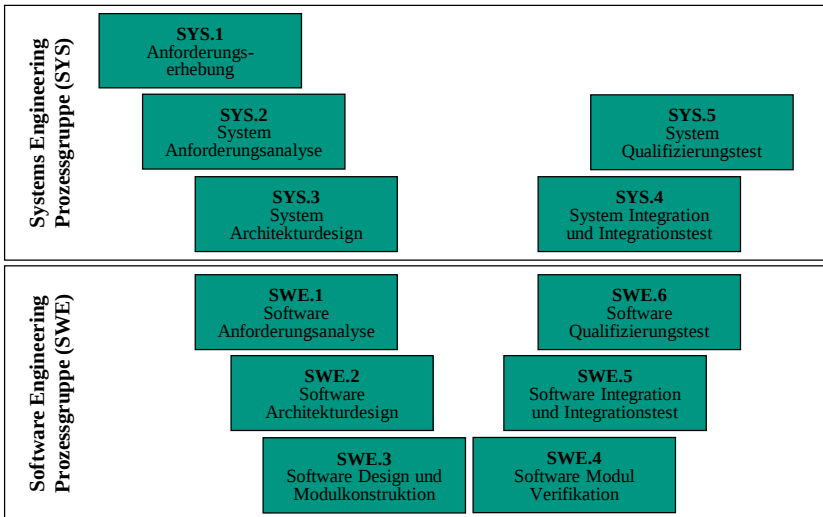


Abbildung 2.7: Darstellung der Automotive-SPICE Prozessschritte im V-Modell nach [37]

Nach Automotive-SPICE gliedert sich das V-Modell vertikal in den oberen Teil des sogenannten Systems Engineerings (SYS) und den unteren Teil des sogenannten Software Engineerings (SWE, s. Abb. 2.7). Die einzelnen Prozessschritte im V-Modell werden im Folgenden anhand der Darstellung von Automotive-SPICE kurz erklärt. Im linken Ast des V-Modells werden Anforderungen zunächst auf Systemebene erhoben (SYS.1), analysiert (SYS.2) und münden anschließend im Systemarchitekturentwurf (SYS.3). In unserem

¹² Software Process Improvement and Capability Determination

¹³ Verband der Automobilindustrie e.V.

Fall entsprechen diese Anforderungen auf Systemebene den Kundenbedürfnissen. Darauf basierend werden die Anforderungen auf Softwareebene analysiert (SWE.1) und zu einem Softwarearchitekturentwurf (SWE.2) verarbeitet. Der maximale Detaillierungsgrad wird im Softwareentwurf und der Implementierung (SWE.3) der zuvor spezifizierten Module erreicht, was gleichzeitig den linken Ast abschließt.

Die implementierten Softwaremodule werden unten im rechten Ast einer Verifikation (SWE.4) unterzogen, bevor sie zu Komponenten integriert und entsprechende Integrationstests (SWE.5) durchgeführt werden. Gegen die zuvor im linken Ast des V-Modells definierten Softwareanforderungen (aus SWE.1) findet im Anschluss der Softwarequalifikationstest (SWE.6) statt. Die gleiche Abfolge aus Integration inklusive Integrationstest (SYS.4) sowie Qualifikationstest (SYS.5) wird abschließend auf Systemebene wiederholt, wobei der Systemqualifikationstest entsprechend gegen die Systemanforderungen (aus SYS.2) stattfindet.

Diese Prozessschritte dienen dazu, das Konzept und die weiteren Ausarbeitungen, die ab Kapitel 4 vorgestellt werden, entsprechend in bekannte Phasen des Entwicklungsprozesses einzuordnen.

2.4 Szenario-Begriff im Kontext von Fahrfunktionen

Um Ereignisse und Zustände zu beschreiben, in denen sich das Fahrzeug mit der Fahrfunktion befinden kann, kommen die aus dem alltäglichen Sprachgebrauch entnommenen Begriffe Szenario, Szene, Szenerie, Situation sowie Manöver zum Einsatz. Im Kontext von Fahrfunktionen ist eine spezielle und konkrete Definition der Begriffe nötig, um ein einheitliches Verständnis von der Bedeutung der Begriffe zu schaffen.

Aus [38], [114], [6] und [3] ergeben sich folgende zusammenfassende Definitionen:

Definition 2.9 (Szenario). Ein Szenario beschreibt die zeitliche Abfolge von Szenen über eine gewisse Zeitspanne beginnend mit einer Start-Szene. Inner-

halb des Szenarios, welches durch Ziele sowie Werte weiter spezifiziert wird, werden die Szenen durch Aktionen und Ereignisse miteinander verbunden.

Definition 2.10 (Szene). Eine Szene beschreibt eine Momentaufnahme des Umfelds, welches aus der Szenerie, dynamischen Elementen, der Selbstrepräsentation aller Teilnehmer sowie der Beziehungen aller Elemente zueinander besteht. Die Selbstrepräsentation umfasst dabei die Fähigkeiten und Fertigkeiten sowie Zustände und Attribute der Teilnehmer. Nur in einer Simulation kann die Szenenrepräsentation allumfassend sein (Ground Truth), da diese in der gemessenen Realwelt immer unvollständig, fehlerbehaftet und subjektiv ist.

Definition 2.11 (Szenerie). Die Szenerie besteht aus der Geometrie und Topologie des Fahrstreifennetzes, der Position stationärer Elemente (z.B. Hindernisse, Bordsteine, Verkehrszeichen, Lichtsignalanlagen), der vertikalen Elevation sowie Umweltbedingungen innerhalb eines Szenarios. Statische Hindernisse können auch die Sicht einschränkende Gegenstände am Straßenrand wie Pflanzen und Gebäude sein.

Je nach Zweck der Anwendung sind unterschiedliche Elemente im Szenario relevant. Schuldt et al. [101] führen daher eine Szenarienbeschreibung in vier Ebenen ein, die sich an der Volatilität der Elemente orientiert. Im PEGASUS Projekt¹⁴ werden sogar sechs Ebenen definiert (s. Abb. 2.8). Die erste und grundlegende Ebene beschreibt die Straßengeometrie und -topologie inklusive der Eigenschaften der Oberfläche. Darauf aufbauend bilden Verkehrszeichen und strukturelle Abgrenzungen die Verkehrsinfrastruktur auf Ebene zwei. Durch die dritte Ebene werden temporäre Manipulationen der ersten beiden Ebenen erfasst, die beispielsweise durch Baustellen entstehen. Aufbauend auf diesen drei statischen Ebenen bilden bewegliche Objekte die vierte Ebene, die durch Umweltparameter wie das Wetter auf Ebene fünf beeinflusst werden. Je nach Kontext bilden Informationen, die über virtuelle Sensoren erfasst werden können, die sechste und oberste Ebene. Dazu gehören Informationen aus digitalen Karten (vgl. 2.5) sowie aus vernetzten Diensten.

¹⁴ https://www.pegasusprojekt.de/files/tmpl/PDF-Symposium/04_Scenario-Description.pdf

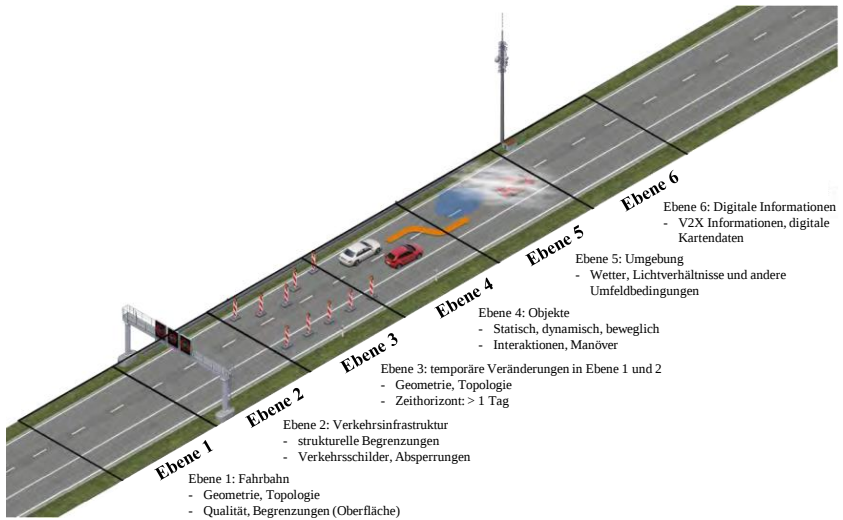


Abbildung 2.8: Ebenen zur Zusammensetzung von Szenarien nach PEGASUS (übersetzt aus dem Englischen)

Neben der Zuordnung der Bestandteile eines Szenarios zu unterschiedlichen Ebenen wird nach Bagschik et al. [7] zusätzlich nach dem Abstraktionsgrad eines Szenarios unterschieden. Die drei Abstraktionsgrade ermöglichen die Anwendung des Szenariobegriffs entlang der einzelnen Phasen des Entwicklungsprozesses (vgl. 2.3) und stehen zueinander in Beziehung (s. Abb. 2.9). In der realen Welt treten während einer Fahrt konkrete Szenarien auf, welche sich durch konkrete Parameterausprägungen repräsentieren lassen. Werden diese Szenarien abstrahiert, erhält man logische Szenarien, welche sich durch festgelegte Parameterbereiche im Zustandsraum auszeichnen. Auf oberstem Abstraktionslevel befindet sich das funktionale Szenario, welches Betriebsszenarien des Entwicklungsgegenstands auf semantischer Ebene darstellt [7].

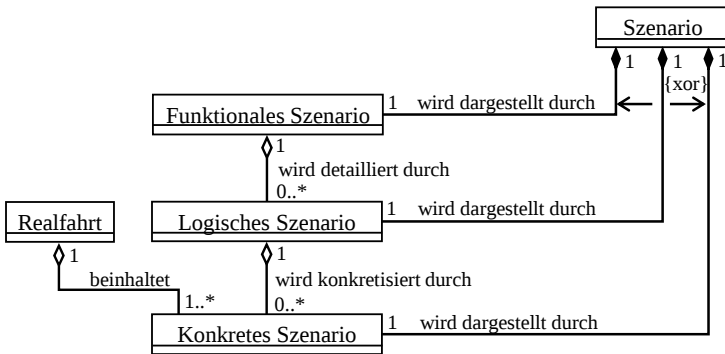


Abbildung 2.9: Drei Abstraktionsebenen von Szenarien als UML-Diagramm (Darstellung nach [108])

Der Begriff Situation ist besonders für die Verhaltensplanung einer automatisierten Fahrfunktion von Bedeutung. An der Stelle wird die Definition von Ulbrich et al. [114] übernommen:

Definition 2.12 (Situation). „Eine Situation beschreibt die Gesamtheit der Umstände, die für die Auswahl geeigneter Verhaltensmuster zu einem bestimmten Zeitpunkt zu berücksichtigen sind. Sie umfasst alle relevanten Bedingungen, Möglichkeiten und Determinanten von Handlungen. Eine Situation wird aus der Szene durch einen Prozess der Informationsauswahl und -augmentierung abgeleitet, basierend auf transienten (z.B. missionsspezifischen) wie auch permanenten Zielen und Werten. Folglich ist eine Situation immer subjektiv, indem sie die Sicht eines Elements repräsentiert.“

Innerhalb eines Szenarios erfolgt anhand von Ereignissen und Aktionen der Übergang von einer Szene zur nächsten. Nagel et al. [68] definieren 17 grundlegende, abstrakte Manöver, mit denen der Verlauf eines Szenarios abgebildet werden kann.

Definition 2.13 (Manöver). Ein Manöver stellt eine abstrakte Darstellung einer Aktion eines Teilnehmers innerhalb eines Szenarios dar.

2.5 Straßennetz und digitale Karten für Fahrfunktionen

Einen weiteren zentralen Bestandteil des in dieser Dissertation entwickelten und angewandten Frameworks bilden digitale Kartendaten. Kartendaten stellen eine räumliche Repräsentation eines Teils der Szenerie (vgl. 2.4) dar. Die Repräsentation basiert dabei auf einem Modell zur Abstraktion der Realwelt hinsichtlich ausgewählter Merkmale. Je nach angestrebter Anwendung der Karte können unterschiedliche Merkmale aus der Realwelt für die Modellierung relevant sein [20].

2.5.1 Aufbau einer Straße

Bevor auf die Repräsentation des Streckennetzes in der Karte eingegangen wird, sollen die hier wesentlichen Bestandteile einer Straße definiert werden. Ganz allgemein definiert die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen eine Straße zu [42]:

Definition 2.14 (Straße). „Verkehrsweg für den nicht schienengebundenen Landverkehr“

Eine Straße setzt sich aus mehreren Bestandteilen zusammen, die in Abb. 2.10 am Beispiel eines Abschnitts einer Bundesautobahn bezeichnet sind. Eine Straße besteht aus einer oder mehreren Fahrbahnen, die wiederum je eine oder mehrere Fahrstreifen enthalten können. Die Begriffe Fahrbahn und Fahrstreifen werden genauer definiert zu [42]:

Definition 2.15 (Fahrbahn). „Aus Fahrstreifen und Randstreifen bestehender, zusammenhängend befestigter Teil der Straße.“

Definition 2.16 (Fahrstreifen). „Durch Markierung gekennzeichnete Teil der Fahrbahn, der für die Fortbewegung einer Fahrzeugreihe bestimmt ist.“

Definition 2.17 (Fahrbahnmarkierung). „Auf der Fahrbahn in Form von Linien, Symbolen, Ziffern oder Schriftzeichen aus Markierungsstoffen, Markie-

Deutschland findet eine Klassifizierung entsprechend der Verortung der Bau- last in Bundesfernstraßen, Landesstraßen, Kreisstraßen sowie Gemeindestra- ßen statt. Eine weitere Einstufung erfolgt hinsichtlich der Anzahl der Fahrbah- nen. Einbahnige Straßen dienen dem „Ein- oder Zweirichtungsverkehr ohne bauliche Fahrbahnnteilung“, während mehrbahnige Straßen mehr als eine Fahr- bahn enthalten [42]. Bei einbahnigen Straßen mit Zweirichtungsverkehr wird auch von einer sogenannten Gegenverkehrsstraße oder Zweirichtungsstraße gesprochen. Bezogen auf die Vorfahrtsituation, die aus dem Straßenverkehrs- gesetz resultiert, können Straßen in Haupt- und Nebenstraßen untergliedert werden und relativ zur Lage zu geschlossenen Ortsschaften zusätzlich in Au- ßerortstraße sowie Innerortstraße [42].

Die Straßenkategorie (SK) leitet sich nach der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [42] aus der Verkehrswegekategorie ab und lässt sich zusammenfassen zu:

Definition 2.18 (Straßenkategorie). „Einteilung der Straßen nach Kategorien- gruppe und Verbindungsfunktion.“ Dabei ist die Kategoriengruppe als „Art, Lage und Umfeld“ und die Verbindungsfunktion als „auf den Verkehr zwi- schen Regionen, Orten und Ortsteilen ausgerichtete Zweckbestimmung von Verkehrswegen“ definiert.

Die US Federal Highway Administration nimmt eine konkrete Einteilung der Straßenklasse¹⁵ in drei funktionale Klassen („arterial“, „collector“, „local“) nach den Hauptkriterien „Access“ und „Mobility“ vor [115]. Dieser Einteilung liegt die Idee zugrunde, dass Straßen unterschiedliche Rollen einnehmen bei der Erfüllung ihrer Funktion, einen Verkehrsfluss durch das Straßennetz zu ge- währleisten [115].

Größere, arterielle Straßen erlauben in der Regel eine hohe Geschwindigkeit sowie ein höheres Fahrzeugvolumen, sodass ein höherer Verkehrsfluss erreicht wird. Dadurch erlauben diese Straßen eine hohe Mobilität, bei gleichzeitig

¹⁵ Der Begriff Straßenklasse wird in dieser Dissertation synonym zur Straßenkategorie verwendet.

reduzierter Zugänglichkeit, da sie meist nur über spezielle Auf- und Abfahrten erreichbar sind. Kleinere, lokale Straßen hingegen weisen einen geringeren Verkehrsfluss auf, sind aber einfacher zugänglich.

In dieser Ausarbeitung wird auf eine konkrete Einteilung in fünf Kategorien $SK \in \{SK1, SK2, SK3, SK4, SK5\}$ zurückgegriffen, die durch das verwendete Kartenmaterial vorgegeben ist. Dabei gilt, je kleiner der Index der SK, desto größer ist das Verkehrsvolumen und die Verkehrsgeschwindigkeit auf den Streckensegmenten dieser SK. Eine grobe Zuordnung der SK kann anhand von Tabelle 2.1 vorgenommen werden. Da die Definition der SK aus dem Kartenmaterial jedoch länderübergreifend gültig ist, gibt es keinen exakten Abgleich mit den deutschen Straßenbezeichnungen.

Tabelle 2.1: Einteilung des Streckennetzes in fünf Straßenkategorien

SK	Äquivalent bezogen auf Deutschland
SK1	Autobahnen, autobahnähnliche Straßen
SK2	restliche Bundesstraßen, Auf- und Abfahrten
SK3	Landesstraßen
SK4	Kreisstraßen, Ortsstraßen
SK5	Wohngebiete, befestigte Feldwege, Parkplätze, ...

Die gesetzlich zulässige Höchstgeschwindigkeit für Streckenabschnitte im Straßennetz ist zudem charakteristisch für die beschriebenen Straßenklassen. In dieser Dissertation wird der Definition aus der Literatur [42] gefolgt, allerdings vereinfachend der kürzere Begriff Tempolimit anstelle der zulässigen Höchstgeschwindigkeit verwendet:

Definition 2.19 (Tempolimit). „Nach Straßenverkehrs-Ordnung generell oder durch Verkehrszeichen örtlich für alle Fahrzeuge oder für bestimmte Fahrzeugarten vorgegebene Geschwindigkeit, die nicht überschritten werden darf.“

2.5.3 Aufbau von digitalen Karten

Im Automobil finden Kartendaten schon lange Anwendung zum Zweck der Navigation. Die anfangs analoge Darstellung des Streckennetzes im Autoatlas wurde abgelöst durch digitale Karten¹⁶, auf Basis derer Navigationsgeräte Routen berechnen und entlang der Route Navigationsanweisungen ausgeben. Analog zur Aufteilung der Szenerie im Rahmen der PEGASUS-Systematik (vgl. 2.4), findet die Repräsentation des Streckennetzes in Karten ebenso auf unterschiedlichen Ebenen statt. Im Pegasus-Modell bildet die unterste Ebene die Topologie, Geometrie, Qualität sowie Oberfläche der Fahrbahn ab. Die

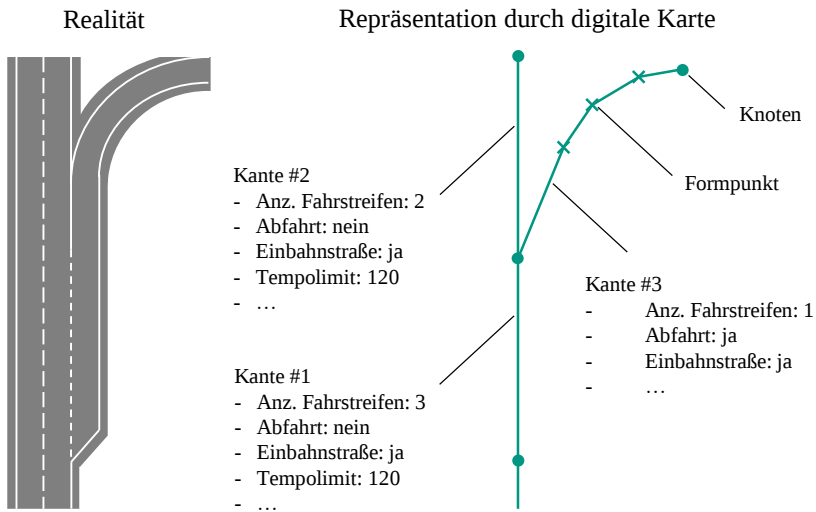


Abbildung 2.11: Repräsentation des Streckennetzes in digitalen Karten

Topologie der Fahrbahnen im Streckennetz wird in der Karte durch Linien-elemente repräsentiert, die dem Prinzip eines Graphen entsprechen, der aus Kanten und Knoten besteht. Jedes Streckensegment im Straßennetz stellt eine Kante dar, die über Knoten am Anfang und am Ende mit weiteren Streckenseg-

¹⁶ Wird in dieser Dissertation allgemein von Karten gesprochen, sind damit digitale Karten gemeint.

Tabelle 2.2: Zuordnung exemplarischer Kartenschichten zu den PEGASUS-Ebenen

Information	PEGASUS-Ebene(n)	Kartenschicht
Fahrbahn-Topologie, Segmentgeometrie	1, 3	Streckensegment
Fahrstreifen-Topologie, Fahrstreifengeometrie	1, 3	Fahrstreifen
Qualität des Fahrstreifenbelags	1, 3	Fahrstreifenbelag
weitere Streckensegment-bezogene Attribute (z.B. Straßenklasse, Anzahl der Fahrstreifen)	2	Streckensegment-Attribute
weitere Fahrstreifen-bezogene Attribute (z.B. Fahrstreifen-individuelles Tempolimit, Art des Fahrstreifens)	2	Fahrstreifen-Attribute

menten verbunden wird. Diese Form der Abstraktion ist exemplarisch anhand einer Richtungsfahrbahn eines Autobahnabschnittes inklusive einer Autobahnausfahrt in Abb. 2.11 dargestellt.

Streckensegmente mit mehreren Fahrstreifen werden zu einer Kante im Graphen zusammengefasst. Streckensegmente mit Kurven (Beispiel: Kante Nr. 3 in Abb. 2.11) können durch zusätzliche, sogenannte Formpunkte approximiert werden. Die Knoten sowie die Formpunkte werden in einem absoluten Weltkoordinatensystem referenziert. Dadurch ist die Geometrie der Streckensegmente definiert und es ist es auch möglich, ein Fahrzeug anhand seiner aktuellen Position innerhalb der digitalen Karte zu lokalisieren.

Diese **Streckensegment-Schicht** auf Fahrbahnebene kann durch eine Fahrstreifen-Schicht erweitert werden. In der **Fahrstreifen-Schicht** werden jedem Streckensegment die dazugehörigen Fahrstreifen einschließlich ihrer geometri-

schen Eigenschaften und der Topologieinformation¹⁷ zugeordnet. Tabelle 2.2 zeigt exemplarisch den Zusammenhang zwischen den PEGASUS-Ebenen und den Karten-Schichten mit den jeweils enthaltenen Informationen.

Die Geometrieinformationen können je nach Kartenanbieter unterschiedlich repräsentiert werden. In der Streckensegment-Schicht kann für jeden Knotenpunkt und Formpunkt zusätzlich zu der absoluten Position der Punkte eine Krümmung angegeben werden.

Definition 2.20 (Kurvenkrümmung). Inverse des Kurvenradius R zur geometrische Beschreibung des Verlaufs von Kurven in der Ebene: $\kappa = 1/R$

Über Interpolation lässt sich somit an jeder Stelle im Streckennetz die Fahrbahnkrümmung ableiten. Dabei ist zu beachten, dass wegen des Bezugs auf die gesamte Fahrbahn, diese Krümmung somit einer mittleren Krümmung für alle Fahrstreifen entspricht. Alternativ zu der Angabe von Krümmungen oder Radien an einem bestimmten Punkt, kann mithilfe von Klothoiden der Verlauf der Krümmung über eine Strecke modelliert werden [86].

Zur geometrischen Beschreibung des Fahrbahnverlaufs in vertikaler Richtung werden hier die Begriffe Steigung und Neigung verwendet.

Definition 2.21 (Steigung). Die Steigung beschreibt die Neigung, also die Höhenzunahme pro Längeneinheit, der Fahrbahn oder eines Fahrstreifens in Fahrtrichtung.

Definition 2.22 (Querneigung). Die Querneigung beschreibt die Neigung, also die Höhenzunahme pro Längeneinheit, der Fahrbahn oder eines Fahrstreifens in Querrichtung (orthogonal zur Fahrtrichtung).

In der Streckensegment-Schicht liegen keine Informationen über die Breite der Fahrstreifen vor. Falls in den Streckensegment-Attributen die Anzahl der Fahrstreifen angegeben ist, kann unter der Annahme von Normfahrstreifenbreiten¹⁸

¹⁷ beschreibt, welche Fahrstreifen von zwei aneinander grenzenden Streckensegmenten jeweils miteinander verbunden sind

¹⁸ siehe exemplarische Regelquerschnitte für Autobahnen in Deutschland [32]

für bestimmte Straßenklassen zumindest näherungsweise eine Fahrbahnbreite bestimmt werden.

In der Fahrstreifen-Schicht hingegen kann die Geometrie durch Formpunkte beschrieben werden, die den Umriss des Fahrstreifenabschnitts abtasten. Dadurch ist es möglich, innerhalb eines Streckensegments variierende Fahrstreifenbreiten sowie Querneigungen indirekt abzubilden. In den Streckensegment- und Fahrstreifen-Attribut-Schichten können weitere Eigenschaften hinterlegt werden, die sich in drei Kategorien einteilen lassen:

1. linienförmige Attribute, die über das gesamte Streckensegment oder den Fahrstreifen konstant sind (z.B. die Information, ob es sich um eine Einbahnstraße handelt)
2. linienförmige Attribute, die nur über Teile des Streckensegments oder des Fahrstreifens konstant sind (z.B. die Information über das zugeordnete Tempolimit)
3. punktförmige Attribute (z.B. die Information über die Position von Stoppschildern)

Neben den bereits genannten Kartenschichten sind theoretisch beliebige viele weitere Schichten möglich, um zusätzliche Informationen zu hinterlegen. Wie auch die Attribut-Schichten referenzieren die zusätzlichen Schichten¹⁹ immer auf die Topologie- und Geometrie-Schichten.

Generell können sich die Kartenschichten hinsichtlich folgender Kriterien unterscheiden:

- Art der enthaltenen Karteninformation
- Art der Erstellung oder Quelle der Karteninformation
- Qualität und Genauigkeit der Informationen

¹⁹ Ein Beispiel dafür ist die in Tabelle 2.2 aufgelistete Fahrstreifenbelag-Schicht.

- Verfügbarkeit/Abdeckung: Anteil des Streckennetzes, für das Informationen vorliegen
- Update-Frequenz der Information²⁰

2.5.4 Kartentypen und deren Anwendung

Je nach Anwendungsfall der Karten ergeben sich unterschiedliche Kartentypen, die sich nach den enthaltenen Kartenschichten (s. Tab. 2.2) differenzieren. In dieser Dissertation wird zwischen drei Kartentypen unterschieden, auf die im Folgenden kurz eingegangen wird:

1. SD-Karte für Navigation
2. SD-Karte für ADAS
3. HD-Karte für ADS

Die **SD-Karte für die Navigation** basiert auf der Streckensegment-Schicht. Die enthaltene Topologie und Geometrie erlaubt bereits eine effiziente Routenberechnung sowie eine straßengenaue Lokalisierung. Akustische und optische Navigationshinweise können über weitere Schichten hinzugefügt werden. Neben der Lokalisierung dient die hinterlegte Geometrie zusätzlich der Visualisierung des Streckennetzes in der grafischen Mensch-Maschine-Schnittstelle des Navigationssystems.

Digitale Kartendaten finden seit einiger Zeit über die reine Navigationsaufgabe hinaus zunehmend Anwendung für ADAS und ADS als elektronischer Horizont, als Erweiterung der Fahrzeug-gebundenen Umfeldsensorik sowie für die Lokalisierung des Ego-Fahrzeugs.

Definition 2.23 (Elektronischer Horizont). Der elektronische Horizont fasst Informationen zum vor dem Fahrzeug liegenden Streckenabschnitt zusammen

²⁰ Informationen mit höherer Änderungsfrequenz, wie bspw. temporäre Veränderungen durch Baustellen (vgl. PEGASUS-Ebene 3, s. Abb. 2.8) erfordern auch eine entsprechende Update-Frequenz, um die Karteninformationen aktuell zu halten.

und stellt diese für Fahrzeugfunktionen mit gewisser Vorausschau zur Verfügung. Neben der Fahrzeug-gebundenen Umfeldsensorik, enthält der elektronische Horizont meist zusätzlich Informationen aus digitalen Karten sowie vernetzten Diensten.

Prädiktive Fahrerassistenzsysteme beispielsweise nutzen Informationen über den vorausliegenden Streckenabschnitt für ein effizientes Energiemanagement durch Ansteuerung des Antriebsstrangs [84] oder für eine vorausschauende Fahrweise bei einer PCC [2]. Für diese Anwendungen (**SD-Karte für ADAS**) werden die Topologieinformationen der Navigationskarte um weitere geometrische Informationen zum genauen Streckenverlauf erweitert. Zusätzlich verwendet eine PCC das Wissen über Verkehrszeichen, wie Tempolimits und Vorfahrtszeichen, aus den Kartendaten für die Anpassung der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit.

Damit ADAS all diese Informationen über den jeweils vorausliegenden Streckenabschnitt im Fahrzeug abrufen und daraus den elektronischen Horizont aufbauen können, werden die Kartendaten in einer relationalen Datenbank abgelegt. Vertiefende Informationen zum Aufbau und zum Inhalt der Datenbank liefert exemplarisch der Navigation Data Standard, der eine Standardisierung des Aufbaus und des Inhalts von Navigationskarten im Fahrzeug zum Ziel hat [69].

Während für die Längsführung einer PCC die Genauigkeit der Kartendaten in der SD²¹ Ausführung für einen Großteil der Szenarien (vgl. 2.4) ausreicht, wird für die Quersführung eine höhere Auflösung benötigt. Für höhere Automatisierungsstufen ($\geq$ SAE Level 3, s. Abb. 2.2) sind eine Fahrstreifen-genaue Lokalisierung des Fahrzeugs und die genaue Kenntnis des Verlaufs der einzelnen Fahrstreifen nötig.

Bezogen auf Abb. 2.11 muss die Repräsentation in der Karte also zusätzlich die Position und Bedeutung aller eingezeichneten Fahrstreifenmarkierungen

²¹ Standard Definition

enthalten [124]. Diese sogenannten HD-Karten²² stellen neben der erhöhten Genauigkeit außerdem Anforderungen an die Aktualität des Kartenmaterials. Zusätzliche Kartenschichten können in **HD-Karten für ADS** verwendet werden, um Merkmale darin abzuspeichern, anhand derer eine genaue Lokalisierung des Fahrzeugs relativ zur Karte möglich ist, ohne allein von der GNSS-Positionierung abhängig zu sein.

Im Rahmen dieser Dissertation liegt der Fokus auf längsregelnden Systemen. Wegen der höheren Abdeckung und Verfügbarkeit von SD-Karten für ADAS werden diese hier verwendet und die damit gegebenenfalls einhergehenden Einschränkungen diskutiert.

2.6 Prädiktive Fahrfunktionen für assistiertes und automatisiertes Fahren

Während konventionelle ACC-Systeme in der Regel anhand von am Fahrzeug verbauter Radar- und Videosensorik lediglich Objekte im direkten Fahrzeugumfeld beobachten, greifen PCC-Systeme zusätzlich auf Informationen über den vorausliegenden Streckenabschnitt zurück. Der zugrundeliegende elektronische Horizont (vgl. 2.5.4) basiert auch auf Daten, die außerhalb des Fahrzeugs generiert werden. Dazu gehören digitale Kartendaten sowie Attribute aus vernetzten Diensten. Über diese Dienste können einerseits Informationen in Echtzeit übertragen werden, wie beispielsweise der Status von Lichtsignalanlagen oder lokale Gefahrenwarnungen, und andererseits Updates für die im Fahrzeug gespeicherten Kartendaten bereitgestellt werden. Für Kartenattribute mit relativ hoher Änderungsfrequenz, wie beispielsweise Streckensegmentabhängige Tempolimits, existieren zudem dedizierte Dienste, die das Ziel haben, diese Kartenattribute möglichst aktuell zu halten [76].

²² High Definition

2.6.1 Vorteile prädiktiver Längsregelfunktionen

Von diesem erweiterten Horizont von bis zu 3 km Länge profitieren insbesondere längsregelnde Fahrfunktionen, die dadurch in der Lage sind, die Fahrgeschwindigkeit vorausschauender und somit auch komfortabler zu planen [2]. Das Assistenzsystem PCC wurde ursprünglich als Evolution des ACC zur intelligenten Reduzierung des Energieverbrauchs entwickelt und in der Wissenschaft in unterschiedlichen Varianten für den Einsatz in PKW [116], [9], [22], sowie LKW [33] untersucht.

Durch die Modellierung der Fahrwiderstände sowie Antriebsstrangkomponenten²³ und die Kenntnis des vorausliegenden Streckenabschnitts wird eine prädiktive Trajektorienplanung möglich, die auf einer globalen Optimierung mit den Kriterien Energieeffizienz, Reisezeit und Komfort beruht. Die geplanten Längsbeschleunigungen des Ego-Fahrzeugs werden dabei so optimiert, dass der Antriebsstrang in einem möglichst effizienten Betriebspunkt²⁴ operiert und das Fahrtziel gleichzeitig schnell und komfortabel erreicht wird. Eine tiefergehende Beschreibung der Funktionsprinzipien einer PCC findet sich in der Literatur [116].

Der Fahrkomfort wird insbesondere dadurch gesteigert, dass notwendige Abbremsvorgänge mit einer niedrigen absoluten Verzögerung durchgeführt werden können, da durch den Vorausschauhorizont der Verzögerungsvorgang langfristig geplant werden kann. Ein Rechenbeispiel soll zeigen, wie wichtig diese Vorausschau ist. Angenommen werde ein Wechsel der Setzgeschwindigkeit von $v_0 = 200$ km/h auf $v_I = 120$ km/h, wie er beispielsweise durch einen Übergang des Tempolimits auf einer deutschen Autobahn hervorgerufen werden könnte (s. Abb. 2.12).

²³ Zu den Antriebsstrangkomponenten zählen beim verbrennungsmotorischen Antrieb Verbrennungsmotor, Kupplung, Schaltgetriebe und Differenzialgetriebe. Beim elektrischen Antrieb werden die Komponenten Batterie, Umrichter, elektrische Antriebsmaschinen und Getriebe berücksichtigt.

²⁴ Der Betriebspunkt wird hier definiert durch die Drehzahl und das Drehmoment des Antriebsaggregats (elektrisch oder verbrennungsmotorisch) sowie dem gewählten Gang im Schaltgetriebe (sofern vorhanden).

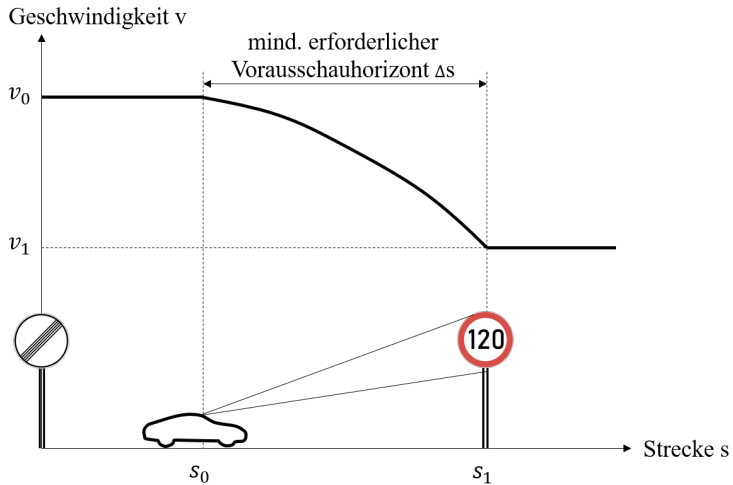


Abbildung 2.12: Schematische Darstellung des erforderlichen räumlichen Vorausschauhorizonts der Onboard-Sensorik ohne Verwendung prädiktiver Daten am Beispiel des Tempolimitübergangs von *Tempolimit unbegrenzt* auf *Tempolimit 120*

Definition 2.24 (Setzgeschwindigkeit). Die Setzgeschwindigkeit (SG) beschreibt den Sollwert der Längsgeschwindigkeit, der im Längsregelsystem eingestellt ist. Im Falle eines ACC wird die SG vom Fahrer vorgegeben und ist die Geschwindigkeit, die in Freifahrt eingeregelt wird. Bei einer PCC wird die SG vom System vorgegeben, kann aber durch den Fahrer adaptiert werden.

Definition 2.25 (Freifahrt). Freifahrt beschreibt einen Zustand des längsregelnden Systems, bei dem sich kein vorausfahrendes Objekt im unmittelbaren Umfeld des Ego-Fahrzeugs befindet, sodass die Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs unabhängig von anderen Verkehrsteilnehmern ist. Das Gegenteil der Freifahrt wird als Folgefahrt bezeichnet.

Für den Verzögerungsvorgang mit einer konstanten, negativen Beschleunigung a_{max} ergibt sich für den benötigten Weg Δs , um von der Ausgangs-SG v_0 auf die Ziel-SG v_1 zu verzögern, der Zusammenhang

$$\Delta s = s_1 - s_0 = \int_0^{t_1} v(t) dt = \int_0^{t_1} (v_0 + a_{\max} t) dt = \frac{1}{2 a_{\max}} (v_1^2 - v_0^2) \quad (2.1)$$

mit $t_1 = (v_1 - v_0)/a_{\max}$ und $a_{\max} = \text{const.}$ Werde weiterhin als maximal mögliche Verzögerung der durch die ISO-Norm²⁵ [48] vorgegebene Wert von $a_{\max} = -3,5 \text{ m/s}^2$ angenommen, ergibt sich eine Verzögerungsstrecke von $\Delta s \approx 282,2 \text{ m}$. Dieser recht theoretische Fall verdeutlicht bereits, wie hoch die Anforderungen an die Performance der Wahrnehmung sein müssen, um die beschriebene prädiktive Tempolimitübernahme auch bei höheren Geschwindigkeiten umsetzen zu können. Durch die Berücksichtigung von maximal zulässigen Ruckgrenzen sowie Komfortlimitierungen ergeben sich geringere realisierbare Verzögerungswerte und somit höhere Verzögerungsstrecken. Daraus lässt sich auch schlussfolgern, dass die Onboard-Sensorik ohne die Verwendung von Kartendaten in der Lage sein müsste, bei der oben berechneten Distanz immer noch zuverlässig Tempolimit-Schilder zu erkennen²⁶.

Ähnlich verhält es sich mit scharfen Kurven auf Landstraßen. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass eine sichere und komfortable Kurvendurchfahrt möglich ist, wenn das jeweils gültige gesetzliche Tempolimit als SG für die Längsregelung verwendet wird. Kartendaten unterstützen dabei, schon weit vor der Kurve eine Einschätzung über die Krümmung der Kurve abzugeben, die die Onboard-Sensorik erst bei der Einfahrt in die Kurve ermitteln könnte.

Diese Fusion von Informationen aus Quellen mit komplementären Eigenschaften führt also nicht nur zu mehr Komfort und Energieeffizienz, sondern macht automatisierte Fahrfunktionen auch erst möglich. Im Gegensatz zum ACC kann die PCC also auch in vielen Situationen genutzt werden, in denen sich

²⁵ Für den Geschwindigkeitsbereich oberhalb von 20 m/s erlaubt die ISO 15622:2018 die angegebene maximale Verzögerung beim Geschwindigkeitsabbau. Die ISO-Norm definiert Performanceanforderungen und Testprozeduren für ACC Systeme.

²⁶ Aktuelle kamerabasierte Systeme besitzen eine Sichtweite von etwa 10...100 m für die Erkennung von Verkehrszeichen [62].

das Ego-Fahrzeug in Freifahrt befindet. Es wird dadurch also effektiv die ODD erweitert (vgl. 2.2.1).

Ein zusätzlicher Vorteil der Verwendung von Kartendaten ist die Unabhängigkeit von Witterungseinflüssen. Die Onboard-Sensorik hat eine verminderte Leistungsfähigkeit beispielsweise bei starkem Regen, Nebel, Blendung durch Sonnenstrahlung sowie Dunkelheit [62].

2.6.2 Aufbau und Funktionsweise der betrachteten PCC

Im Umkehrschluss bedeutet die zusätzliche Funktionalität jedoch auch eine gesteigerte Komplexität in der Systemarchitektur und der algorithmischen Umsetzung. Zur Verdeutlichung dieser Komplexität und zur Veranschaulichung der Funktionsweise der PCC, zeigt Abb. 2.13 eine Übersicht über die logische Systemarchitektur der hier betrachteten PCC, die als Fahrfunktion Schnittstellen zur Umwelt, zum Fahrzeug und zum Fahrer besitzt. Die Architektur stellt eine detaillierte und auf die in dieser Dissertation untersuchte PCC angepasste Version der bereits vorgestellten allgemeinen logischen Architektur für automatisierte Fahrfunktionen (s. Abb. 2.5) dar. Da es sich bei der PCC um ein assistiertes System handelt, wird im Modul Planung lediglich die Trajektorienplanung betrachtet, die die Navigation und Manöverplanung implizit berücksichtigt.

Wahrnehmung

Innerhalb des Moduls Wahrnehmung werden in den drei Submodulen Sensorik, Erkennung und Fusion & Modellierung die eingehenden Daten aus verschiedenen Quellen zu Modellen verarbeitet, die das statische sowie dynamische Fahrzeugumfeld sowie den Fahrzeugzustand repräsentieren. Als Umfeldsensorik nutzt die hier betrachtete PCC eine Frontkamera sowie einen nach vorne gerichteten Radarsensor. Die dabei generierten Sensorrohdaten sind im nächsten Schritt Ausgangsbasis für die Erkennung sowie Verfolgung dyna-

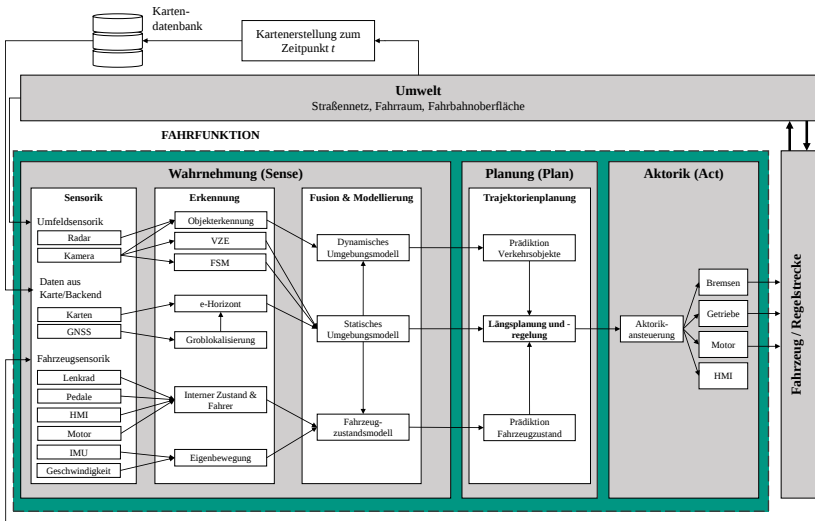


Abbildung 2.13: Logische Systemarchitektur der hier betrachteten PCC unterteilt in die Module Wahrnehmung, Planung sowie Aktorik (angepasst nach [3])

mischer Objekte²⁷. Zusätzlich werden im Rahmen der Bildverarbeitung der Kameradaten mithilfe der Verkehrszeichenerkennung (VZE) Straßenschilder identifiziert sowie Fahrstreifenmarkierungen (FSM) extrahiert. Die FSM geben Informationen über die horizontale Krümmung des vor dem Fahrzeug liegenden Straßenabschnitts und unterstützen bei der Feinlokalisierung des Ego-Fahrzeugs innerhalb des Fahrstreifens sowie innerhalb der Fahrbahn (vgl. 2.5). Der GNSS-Sensor dient zur Groblokalisierung des Ego-Fahrzeugs auf einer Straße oder Fahrbahn. Zusammen mit den zu der Fahrzeugposition gehörenden Daten aus der digitalen SD-Karte (vgl. 2.5.4), wird der elektronische Horizont bereitgestellt.

Im Rahmen der Produktion des Fahrzeugs wird eine Karten-Datenbank auf

²⁷ Zu den dynamischen Objekten zählen andere zwei-, vier- oder mehrrädriige Kraftfahrzeuge, aber auch Fußgänger und Fahrradfahrer, vgl. Ebene 4 im PEGASUS Szenarienmodell in Abb. 2.8.

dem Fahrzeug installiert. Dabei wird die zu dem Produktionszeitpunkt verfügbare neueste Version verwendet. Während der Fahrzeuglebensdauer wird diese Datenbank im Fahrzeug in bestimmten Abständen (z.B. vierteljährlich) aktualisiert [76]. Die gesamte Dauer von einer Änderung in der Realwelt bis zum Update der Karte im Fahrzeug ist das Alter der Information in der Karte. Dadurch, dass diese Update-Pipeline prinzipbedingt immer eine Dauer $t_{update} > 0$ besitzt, wird die Information aus der Karte grundsätzlich als veraltet betrachtet. Die zeitliche Dauer der Pipeline ist variabel und hängt unter anderem von der Technologie ab, wie Updates ermittelt werden.

Durch die Fusion aus elektronischem Horizont sowie erkannten Verkehrszeichen und Fahrstreifenmarkierungen entsteht das statische Umgebungsmodell. Das statische Umgebungsmodell wird im Nahbereich (ca. 0...100 m) noch von den Informationen aus der Umfeldsensorik geprägt, während im Fernbereich (ca. 100...3000 m) nur noch Informationen aus Kartendaten einfließen [62].

Neben statischem und dynamischem Umgebungsmodell benötigt die PCC zusätzlich Informationen über den aktuellen Status des Fahrzeugs und des Fahrers, die im Fahrzeugzustandsmodell zusammengefasst werden. Die Eigenbewegung des Ego-Fahrzeugs wird über die Geschwindigkeit aus Raddrehzahlsensoren sowie anhand der Bewegungsgrößen²⁸ aus einer Inertialmesseinheit²⁹ (IMU) abgeleitet. Weitere interne Zustände umfassen den Lenkradwinkel, das aktuelle Drehmoment sowie die Drehzahl des Antriebsaggregats und, falls ein Schaltgetriebe vorhanden ist, den aktuellen Gang.

Planung

Ausgehend von der Fusion und Modellierung findet im nächsten Schritt die Trajektorienplanung statt. Dazu liefert das statische Umgebungsmodell Informationen zum vorausliegenden Streckenabschnitt, wie unter anderem die Kurvenkrümmung, das Tempolimit und Vorfahrtsregelungen. Basierend auf dem dynamischen Umfeldmodell wird das zukünftige Verhalten der erfassten

²⁸ Sechs Freiheitsgrade: drei Raumrichtungen, drei orthogonale rotatorische Bewegungen

²⁹ Engl. inertial measurement unit

Verkehrsobjekte prädiziert. Ebenso wird auch der Fahrzeugzustand in Abhängigkeit der in der Längsplanung berechneten Trajektorien als Teil der MPC (vgl. 2.2.3) berechnet.

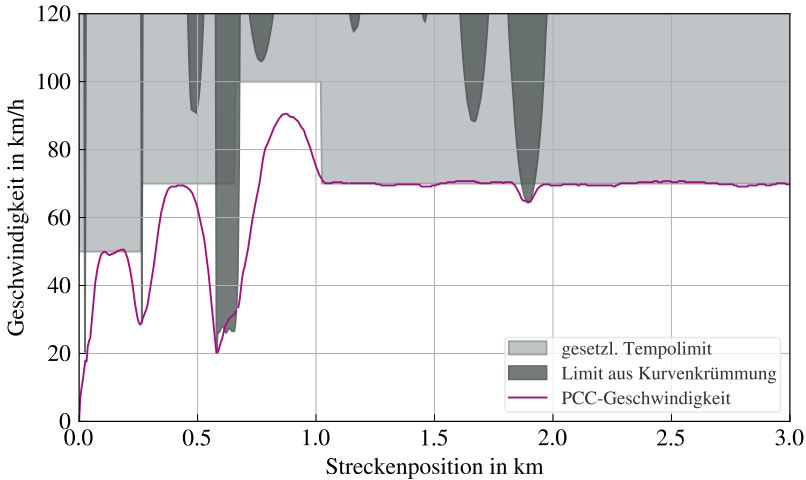


Abbildung 2.14: Beispiel für die optimale Planung der Fahrgeschwindigkeit basierend auf dem gesetzlichen Tempolimit sowie Limitierungen aus dem Kurvenradius des Streckenverlaufs. Dabei wird nach den drei Kriterien *geringe Zeit*, *geringer Energieverbrauch* sowie *komfortable Beschleunigungen* optimiert.

Die Funktionsweise der prädiktiven Geschwindigkeitsplanung ist exemplarisch in Abbildung 2.14 visualisiert. In dem Graphen ist die Geschwindigkeit über der vor dem Fahrzeug liegenden Streckenposition aufgetragen. Zum gegebenen Zeitpunkt befindet sich das Ego-Fahrzeug also an Streckenposition „0“ und bezieht aus dem elektronischen Horizont Informationen über das gesetzliche Tempolimit (gestricheltes Rechteckprofil) sowie die Kurvenkrümmungen für den vorausliegenden Streckenabschnitt (hier 3 km). Aus dem Verlauf der Kurvenkrümmungen wird ein Geschwindigkeitslimit abgeleitet, das zusammen mit dem gesetzlichen Tempolimit als Eingangsgröße für die Trajektori-

enoptimierung dient. Die berechnete Trajektorie ist in der Abbildung als PCC-Geschwindigkeit dargestellt und wird also schon einige Kilometer im Voraus geplant.

Aktorik

Die Umsetzung der geplanten Solltrajektorie findet in der Aktorik statt. Die Aktorikansteuerung berechnet die notwendigen Stellgrößen, die wiederum an den Aktoren für die Längsdynamik (Bremsen, Getriebe und Motor) umgesetzt werden und somit die Fahrzeugbewegung relativ zur Umwelt beeinflussen. Durch die Verwendung einer MPC ist, eine ausreichende Modellgüte vorausgesetzt, implizit sichergestellt, dass zur Erzielung der geplanten Solltrajektorie die Stellgrößen nicht die maximal zulässigen Werte der jeweiligen Aktoren überschreiten. Abgesehen von Modellungenauigkeiten in der MPC, ergeben sich Abweichungen zwischen Soll- und Isttrajektorie somit nur durch äußere Störgrößen.

Automatisierungslevel und Interaktion mit dem Fahrer

Der Fahrer hat die Möglichkeit über Elemente der Nutzerschnittstelle³⁰ (HMI) mit dem System zu interagieren. Die anzeigenden Elemente des HMI liefern Informationen über den aktuellen Systemzustand und Ankündigungen zu den bevorstehenden Szenarien³¹. Über die Bedienelemente (Pedale, Lenkradhebel und -schalter) stellt der Fahrer das System ein und übernimmt bei Bedarf die Kontrolle.

Laut SAE-Automatisierungslevel (vgl. 2.2.1) handelt es sich bei der hier beschriebenen PCC um ein assistiertes System (SAE-Level 1), sofern es nicht mit einer Querverführung zu einem teilautomatisierten System (SAE-Level 2) kombiniert wird. Weitestgehend unabhängig vom Automatisierungslevel ist die ODD. Dadurch, dass der Fahrer als Rückfallebene fungiert, kann die ODD

³⁰ Engl. human machine interface

³¹ Ein solches Szenario kann beispielsweise die prädiktive Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit in Antizipation eines vorausliegenden niedrigeren Tempolimits sein.

der Fahrfunktion im Vergleich zu Systemen höheren Automatisierungslevels, die meist nur auf Autobahnen und autobahnähnlichen Straßen operieren können, ausgeweitet werden.

2.6.3 Abgrenzung der PCC zu anderen automatisierten Fahrfunktionen

Automatisierte Fahrfunktionen werden häufig primär hinsichtlich ihres Automatisierungslevels eingeordnet (vgl. 2.2.1). Über das Automatisierungslevel wird definiert, wer (Fahrer oder System) zu welchem Umfang die DDT (Längs- und Querführung des Fahrzeugs und die Überwachung der Fahrumgebung) sowie die Rückfallebene ausführt. Um nun allerdings beurteilen zu können, zu welchen Anteilen eine konkrete Fahrt von A nach B vom System und zu welchen Anteilen vom Fahrer bewältigt wird, existiert zusätzlich die Charakterisierung der Fahrfunktionen bezüglich der ODD (vgl. 2.2.1).

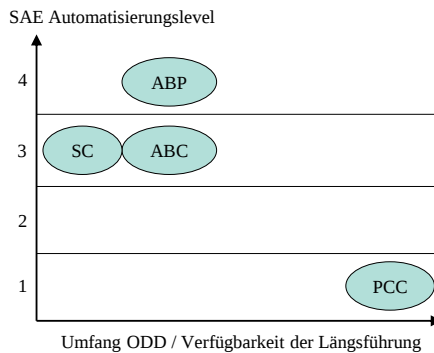


Abbildung 2.15: Vergleichende Einordnung exemplarischer Fahrfunktionen hinsichtlich SAE-Level und ODD (SC = Stauchaffeur, ABC = Autobahnchaffeur, ABP = Autobahnpilot, PCC = Prädiktive Längsführung)

Um den wesentlichen Unterschied zwischen der oben vorgestellten PCC zu anderen automatisierten Fahrfunktionen zu verdeutlichen, soll hier eine gleich-

zeitige Einordnung mehrerer Systeme relativ zu beiden oben genannten Kriterien (Automatisierungslevel und Umfang der ODD) erfolgen (s. Abb. 2.15). Zu diesem Zweck werden neben der PCC exemplarisch die im Kontext des PEGASUS-Projekts³² definierten Fahrfunktionen Stauhauffeur (SC), Autobahnhauffeur (ABC) sowie AutobahnpiLOT (ABP) betrachtet.

Der SC ist ein automatisiertes System auf SAE Level 3, das in Stausituationen auf Autobahnen und autobahnähnlichen Straßen bis zu einer Geschwindigkeit von 60 km/h die DDT übernimmt. Das System erkennt, wenn es seine Systemgrenzen erreicht und übergibt an den Fahrer, der als Rückfallebene zur Verfügung steht. Der ABC ist vom Prinzip ähnlich wie der SC, jedoch wird die ODD um einen erhöhten Geschwindigkeitsbereich von bis zu 130 km/h erweitert, sodass der ABC in der Grafik rechts vom SC einzuordnen ist. Der ABC ist zudem in der Lage, andere Fahrzeuge zu überholen. Beim ABP hingegen ändert sich der Umfang der ODD nicht im Vergleich zum ABC, sondern das Automatisierungslevel. Damit ist das System innerhalb der ODD in der Lage, auch ohne den Fahrer als Rückfallebene zu agieren, sodass letzterer auch fahrfremde Tätigkeiten während der Fahrt wahrnehmen kann.

Dem gegenüber steht die PCC, die durch die Übernahme nur der Längsführung lediglich ein Automatisierungslevel von 1 erreicht, diese Längsführung aber in einer breiten ODD zur Verfügung stellt. Als Assistenzsystem muss die PCC die Fahrumgebung nicht vollständig überwachen und auch die funktionalen Systemgrenzen nicht vorausschauend prüfen, sodass die ODD deutlich einfacher auf neue Anwendungsfälle erweitert werden kann. Für den Fall, dass die Systemgrenzen überschritten werden, übergibt das System die Längsführung augenblicklich an den Fahrer, der ohnehin kontinuierlich die Querführung übernimmt.

Ziel der PCC ist somit, über einen möglichst großen Teil der zurückgelegten Fahrstrecke die Fahrzeuglängsführung zu übernehmen (hohe Verfügbarkeit in Kombination mit hohem Komfort), sodass der Fahrer entlastet wird und mög-

³² <https://www.pegasusprojekt.de/de/>

lichst selten eingreifen muss. Beim ABC hingegen liegt der Fokus bei der Absicherung primär auf der Gewährleistung eines sicheren Funktionsverhaltens innerhalb der stark begrenzten ODD. Dieser Sicherheitsnachweis ist Gegenstand diverser aktueller Forschungsansätze (u.a. [118], [56], [7]).

Aber auch für diese Funktionen stellt sich nach erfolgreichem Sicherheitsnachweis die Frage nach dem Mehrwert, den die Fahrfunktion liefert. Ein System, das den Benutzer in geringen zeitlichen Abständen zur Übernahme auffordert, erfüllt wahrscheinlich nicht den gewünschten Effekt den Fahrer zu entlasten.

Ein Ziel der hier betrachteten Validierung ist es also, für assistierte Systeme sowie automatisierte Systeme, bei denen der Sicherheitsnachweis gegeben ist, den funktionalen Mehrwert für den Nutzer zu quantifizieren.

2.7 Verfahren zur Routengenerierung

Vorbereitend für die Beantwortung der Forschungsfrage 2 (vgl. 1.2) werden bestehende Verfahren zur Routengenerierung betrachtet, die im Rahmen virtueller Testfahrten zum Einsatz kommen können. Sind Routen für die virtuelle Testfahrt nicht bereits aus anderen Quellen vorhanden (vgl. 2.7.1), ist es erforderlich, Routen zu generieren. Für die RGE werde zwischen zwei Paradigmen unterschieden, die im Folgenden diskutiert werden. Die klassische Routenplanung berechnet eine Route zwischen einem Ursprungspunkt P_1 und einem Zielpunkt P_2 und werde hier abgrenzend als globale Routenplanung (vgl. 2.7.3) bezeichnet. Dem steht die sequenzielle Kantenwahl gegenüber, bei der ausgehend von einem Ursprungspunkt P_1 an jedem Knoten eine Kante³³ ausgewählt wird, die weiter verfolgt wird (vgl. 2.7.2).

2.7.1 Verwendung aufgezeichneter Routen

Bereits vorhandene, aufgezeichnete Routen können aus verschiedensten Quellen stammen, von denen hier nur exemplarisch drei aufgeführt werden. Je nach

³³ Begriffserklärung s. Abb. 2.11

Quelle unterscheiden sich die Routen vor allem in Umfang sowie Verfügbarkeit.

Aufgezeichnete Erprobungsdaten: Im Rahmen der Entwicklung und insbesondere vor der Freigabe von Fahrfunktionen werden beim OEM Feldtests (vgl. 3.2.2) durchgeführt, während derer die fahrzeuginterne Kommunikation abgespeichert wird. Diese aufgezeichneten Daten enthalten optional auch die mit der Lokalisierung (über GNSS, vgl. 2.6.2) im Fahrzeug ermittelten Positionsangaben. Eine beispielhafte Anwendung ist die reaktive Resimulation [4].

Vorgegebene Referenzstrecken: Vorgegebene Routen von Referenzstrecken stammen entweder aus einem Fachbereich der Funktionsentwicklung beim OEM oder aber auch von unabhängigen Automobilfachzeitschriften [43]. Diese haben das Ziel die Vergleichbarkeit zu erhöhen (z.B. zwischen zwei Softwareständen im Falle der Entwicklung, bzw. zwischen den Systemen mehrerer Hersteller im Falle der Fachzeitschrift), indem die Systeme jeweils möglichst ähnlichen Szenarien auf den Referenzstrecken ausgesetzt werden.

Kundenfahrzeugflotte: Sofern die Kundenfahrzeuge mit einer Schnittstelle ausgestattet sind, die im Betrieb das kontinuierliche Aufzeichnen von Daten und deren Übermittlung an den OEM ermöglichen, sind diese eine potenzielle Datenquelle. Da Positionsinformationen allerdings datenschutzrechtlich als besonders sensibel betrachtet werden, werden diese in Datensammelkampagnen häufig nicht mit aufgezeichnet.

Für die aufgezeichneten Daten liegt die Routeninformation R_{record} in der Regel in Form einer Sequenz von Geopositionen

$$R_{record} = (P_k)_{k=1}^n, \text{ mit } P_k = (\varphi_k, \lambda_k) \quad (2.2)$$

mit dem Breitengrad φ und dem Längengrad λ vor. Mit Hilfe eines Map Matchings können diese Geopositionen auf eine Abfolge von Kanten in der Kartendatenbank (vgl. 2.5.3) referenziert werden.

2.7.2 Bestehende Verfahren mit sequenzieller Kantenwahl

Bei der sequenziellen Kantenwahl wird ausgehend von einem Startpunkt an jeder Abzweigung im Straßennetz (vgl. 2.5.3) entschieden, welche der möglichen Kanten verfolgt wird. Aus der Abfolge dieser Kanten ergibt sich dann der Pfad. Es werde ein Beispiel einer exemplarischen Abzweigung (Knoten n) mit mehreren potenziellen Folge-Kanten betrachtet (s. Abb. 2.16), wobei der Knoten über Kante e_1 erreicht wird. Die Entscheidung für eine der Kanten kann

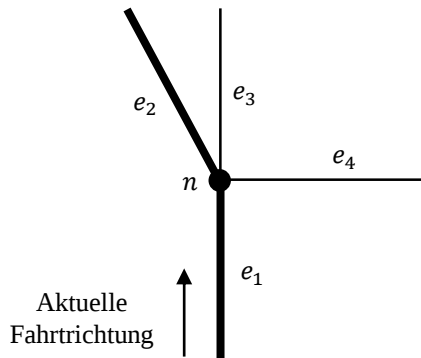


Abbildung 2.16: Beispiel für einen Knoten mit vier angrenzenden Kanten. Das betrachtete Ego-Fahrzeug befindet sich im Ausgangszustand auf der Kante e_1 und bewegt sich in Richtung des angrenzenden Knotens n . Die eingehende Kante e_1 , sowie die schräg nach links ausgehende Kante e_2 weisen die gleiche, höherwertige Straßenkategorie (SK) im Vergleich zu den Kanten e_3 und e_4 auf.

anhand unterschiedlicher Kriterien getroffen werden. Ein mögliches Kriterium ist der wahrscheinlichste Pfad³⁴ (MPP), der auf einer Wahrscheinlichkeit p_i

³⁴ Engl. most probable path

basiert, die jedem der m möglichen Kanten e_i zugewiesen wird. Die auf diese Weise ausgewählte Kante des MPP wird als e_{i^*} bezeichnet, wobei gilt:

$$i^* \in \operatorname{argmax}_{i \in \{1, \dots, m\}} \{p_i\} \quad (2.3)$$

Die Zuordnung der Wahrscheinlichkeiten kann zum Beispiel anhand der SK (vgl. 2.5.2) erfolgen, wobei Pfade mit höherwertiger SK als wahrscheinlicher angenommen werden. Im Beispiel entspricht demnach e_2 dem MPP (s. Abb. 2.16). Diese Methode findet Anwendung im Fahrzeug, um bei nicht automatisierter Fahrt und ohne aktive Zielführung zu prädictieren, welche Route der Fahrer wahrscheinlich wählen wird, um somit den zukünftigen Fahrzeugzustand vorherzusagen [34].

Alternative Entscheidungskriterien sind der geradeste Pfad³⁵ (SP), ein zufällig gewählter Pfad oder ein beliebiges anderes regelbasiertes Verfahren³⁶. Im Beispiel in Abb. 2.16 repräsentiert e_3 den SP.

2.7.3 Bestehende Verfahren mit globaler Routenberechnung

Die globale Routenplanung verfolgt das Ziel eine optimale Route hinsichtlich bestimmter Kriterien, wie bspw. Zeitdauer (schnellste Route) oder Streckenlänge (kürzeste Route) zu bestimmen. Zur Berechnung einer solchen Route zwischen zwei Punkten im Straßennetz und unter Berücksichtigung der Gewichte der Kanten im Graphen, kann der A*-Algorithmus oder Dijkstras-Algorithmus verwendet werden.

Der Vorteil der auf diese Weise generierten Routen liegt in der realistischen Abbildung des Mobilitätsverhaltens von Fahrzeugnutzern, unter der Annahme, dass diese das Fahrzeug nutzen, um auf dem schnellsten Weg von ihrem Standort zu einem gewünschten Zielort zu gelangen. Im Kontext der Reichweitenberechnung für Elektrofahrzeuge legen Thorgeirsson et al. empirische

³⁵ Engl. straightest path

³⁶ Ein Beispiel hierfür wäre, an jeder dritten Kreuzung den Pfad auszuwählen, der am nächsten zu einem 90°-Winkel steht.

Verteilungen zugrunde, um die für den Anwendungsfall relevanten Parameter Routenlänge, Abfahrtszeit sowie die Positionen P_1 und P_2 stochastisch in Form von Stichproben zu bestimmen [112]. Da für die Reichweitenberechnung besonders lange Strecken, auf denen potenziell ein Nachladen erforderlich ist, von Interesse sind, wird die Verteilung für die Routenlänge zu Gunsten längerer Strecken gezielt verzerrt.

Ein nicht-stochastischer, reproduzierbarer Ansatz zur Abdeckung des Streckennetzes anhand von systematischen RGE ist bereits in einer früheren Publikation des Autors beschrieben [133]. Dieser parametrierbare Ansatz berücksichtigt den Zielkonflikt zwischen der gewünschten Abdeckung möglichst aller Kanten und der zu reduzierenden Mehrfachverwendung von Kanten. Ausgehend von einem Ursprungspunkt P_1 wird eine Menge von Zielpunkten $\{P_{2,i}\}_{i=1\dots n}$ definiert, die auf einem Kreis mit dem Radius r_d und dem Mittelpunkt P_1 verteilt sind (s. Abb. 2.17). Dadurch ergeben sich eine Reihe von O/D-Paaren, die zur Berechnung je einer Route herangezogen werden.

Die zugrundeliegende Idee ist, dass auf diese Weise alle möglichen Trips einer bestimmten Länge, die eine Person ausgehend von ihrem Standpunkt unternehmen könnte, modelliert werden. Ein Nachteil dieser Methode liegt darin, dass nicht davon ausgegangen werden kann, dass die erzeugten Routen das Mobilitätsverhalten des Nutzers repräsentativ abbilden. Geografische Regionen, in denen eine höhere Bevölkerungsdichte herrscht, sollten erwartungsgemäß stärker berücksichtigt werden als schwach besiedelte ländliche Regionen.

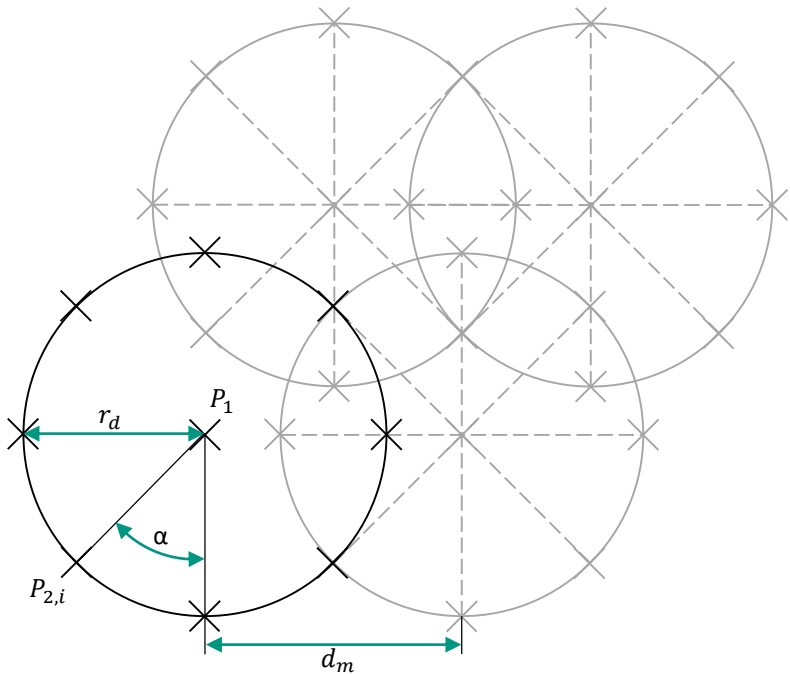


Abbildung 2.17: Schematische Darstellung der Generierung von O/D-Paaren anhand der Destinationskreis-Methode (angepasst nach [133])

Die Parameter der Destinationskreis-Methode (DKM) umfassen

- den Destinationskreisradius r_d
- die Winkelauflösung α sowie
- die Überlappung $v = (2r_d - d_m)/2r_d$,

wobei d_m den geometrischen Abstand der Mittelpunkte zweier benachbarter Destinationskreise beschreibt. Durch die Variation von r_d ändert sich effektiv die Routenlänge. Je größer die Überlappung v der Destinationskreise desto wahrscheinlicher wird es, dass zwei generierte Routen teilweise gleiche Streckensegmente enthalten.

Bei der Berechnung von Abständen zwischen den Punkten P_1 und $P_{2,i}$ wird die Haversine Formel verwendet, die die Kugelform der Erde berücksichtigt [117]. Die generierten Routen R_i werden sowohl für die sequenzielle Pfadwahl als auch für die globale Routenberechnung in Form einer Sequenz von Kanten $(e_k)_{i,k=1\dots n}$ ausgegeben.

2.8 Floating Car Data als Informationsquelle

Während digitale Karten primär statische ortsbezogene Informationen enthalten, die zu einem bestimmten Zeitpunkt erhoben werden und längerfristig Bestand haben, stellen sogenannte Floating Car Data (FCD) dynamische ortsbezogene Daten dar. Nach Shekhar et al. [103] sind FCD Daten, die von einzelnen Fahrzeugen generiert werden, um die Gesamtverkehrssituation zu bewerten, unter der Annahme, dass diese Fahrzeuge im Verkehrsfluss "mitschwimmen". Ein Datensatz enthält dabei mindestens die Geoposition des Fahrzeugs und optional weitere Informationen zur Fahrzeug-Telemetrie.

Im Gegensatz zu im Straßennetz fest installierten Sensoren, wie Induktionsschleifen oder Kameras, werden FCD quasi über sich bewegende Sensoren erzeugt. Die daraus gewonnenen Informationen können Grundlage sein für Mobilitätsdienste, wie die dynamische Routenplanung und automatisch generierte Staumeldungen, ermöglichen aber auch die Generierung digitaler Streckennetze, bzw. das Ableiten von Straßenattributen [61]. Werden die FCD zusätzlich mit einer senderindividuellen Identifikationsnummer versehen, ist es möglich, zusammenhängende Routen der sendenden Fahrzeuge zu ermitteln. Über die daraus resultierenden O/D-Matrizen³⁷ können Verkehrsaufkommen weiter analysiert werden und beispielsweise Grundlage für die Infrastrukturplanung sein [123].

FCD unterscheiden sich also im Informationsumfang und ermöglichen dadurch unterschiedliche Anwendungsfälle. Darüber hinaus können FCD in unterschiedlichen Aggregationsstufen vorliegen. Dadurch, dass sich FCD meis-

³⁷ Ursprung/Ziel, engl. origin/destination

tens auf den Straßenverkehr beziehen, können die Geopositionen statt in Form von absoluten Längen- und Breitengraden auch relativ zum Straßennetz referenziert werden. Ein Beispiel ist das Matchen der Geoposition auf das zugehörige Streckensegment (vgl. 2.5.4), sodass die FCD als weiteres Attribut zusammen mit den Kartendaten verarbeitet werden können. Liegt in den FCD nur eine Geoposition auf Basis von GNSS-Daten vor, reicht die Genauigkeit der Ortsinformation meist nicht aus, um damit ein Fahrstreifen-genaues Matching vorzunehmen, wie es für HD-Karten notwendig wäre. Ein weiterer Nachteil der Referenzierung auf Streckensegmente ist der Informationsverlust in Abhängigkeit der Länge der Streckensegmente.

Neben dieser räumlichen Auflösung spielt zudem die zeitliche Auflösung eine Rolle, sofern FCD auch über die Zeit aggregiert werden. Durch eine zeitliche Aggregation ist es möglich, auch auf historische FCD zuzugreifen und somit die Anzahl der Messungen auf einem gegebenen Streckenabschnitt zu erhöhen. Dabei gilt es zu beachten, dass bestimmte zeitlich abhängige Phänomene bei hoher zeitlicher Aggregation nicht mehr betrachtet werden können, wie z.B. ein erhöhtes Stauaufkommen während des Berufsverkehrs [134].

Eng verwandt mit den FCD sind auch Floating Cellular Data bzw. Floating Phone Data (FPD), bei denen Mobiltelefone nach gleichem Prinzip Datensätze senden, die mindestens eine Orts- und Zeitangabe enthalten [82]. Wird das mobile Endgerät im Fahrzeug mitgeführt, entsprechen die FPD den FCD und können somit als weitere Quelle verwendet werden, sofern die Positionsangabe die gleiche Genauigkeit besitzt.

FCD, die über die Positions- und Zeitangabe hinaus noch weitere Informationen enthalten, werden als xFCD (erweiterte FCD) bezeichnet. Dabei werden die FCD durch Daten vom Fahrzeugbussystem³⁸ oder von weiteren Fahrzeug-gebundenen Umgebungssensoren angereichert. Eine mögliche Anwendung ist

³⁸ Das Bussystem im Fahrzeug dient der Übertragung und dem Austausch von Daten zwischen den einzelnen elektronischen Steuergeräten in einem Fahrzeug

beispielsweise die Auswertung von ESC-Eingriffen³⁹, um über xFCD andere Verkehrsteilnehmer vor Streckenabschnitten mit niedrigem Reibwert zu warnen [97].

³⁹ Die elektronische Stabilitätskontrolle (ESC) versucht durch gezielte radindividuelle Bremsenriffe die vom Fahrer angestrebte Fahrtrichtung herzustellen und verhindert dadurch ein ungewolltes Schleudern des Fahrzeugs

3 Validierung automatisierter Fahrfunktionen

Im Entwicklungsprozess nach dem Software und Systems Engineering ist der rechte, aufstrebende Ast des V-Modells (Abb. 2.7) geprägt von Testaktivitäten im Rahmen der Verifikation und Validierung mit dem Ziel der Qualitätssicherung [118]. Mit einer stetig wachsenden ODD, welche die Fahrfunktionen beherrschen können müssen, nimmt auch der Testaufwand zur Absicherung und Freigabe der Funktionen erheblich zu.

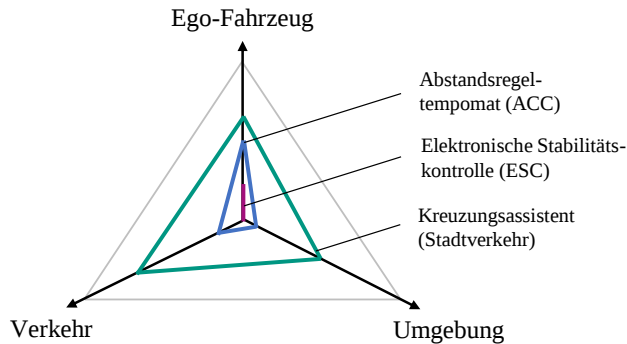


Abbildung 3.1: Einflussfaktoren auf verschiedene Fahrerassistenzfunktionen (Darstellung angepasst nach [54])

Beispielhaft sind in Abb. 3.1 drei Fahrerassistenzfunktionen hinsichtlich der Anzahl ihrer Einflussfaktoren qualitativ dargestellt [54]. Die ESC bezieht nur fahrzeuginterne Eingangsgrößen in die Regelung mit ein und spannt somit nur eine Dimension auf. Bei einem heutzutage verbreiteten ACC werden einerseits mehr fahrzeuginterne Zustände berücksichtigt und andererseits durch

Umfeldsensorik zusätzlich die Fahrzeugumwelt in Form von Verkehrsobjekten und der Umgebung des Fahrzeugs einbezogen. Dadurch werden bereits drei Dimensionen aufgespannt, welche die Anzahl der durchzuführenden Tests signifikant erhöhen. Dimensionen, zwischen denen Wechselwirkungen bestehen, müssen in unterschiedlichen Zustandskombinationen auf Fehlerfreiheit untersucht werden. Während der ACC lediglich den vorausliegenden Verkehr in gleicher Fahrtrichtung betrachtet, muss der Kreuzungsassistent in der Lage sein, angemessen auf eine Vielzahl an Objekten, unterschiedlichsten Verkehrsteilnehmern und vielfältigen Szenarien zu reagieren. Dadurch steigt entlang der einzelnen Dimensionen die Zahl der möglichen Einflüsse, sodass der Zustandsraum, dem die Fahrfunktion ausgesetzt ist, gegenüber dem ACC erneut wächst.

Dieser im Umfang zunehmende Zustandsraum lässt sich proportional in Aufwände für Verifikation und Validierung übersetzen. Daher hat sich das Feld an verfügbaren Testmethoden in den letzten Jahrzehnten ständig vergrößert und wird im Folgenden vorgestellt.

3.1 Definitionen

Auf den verschiedenen Integrationsstufen werden im Rahmen der Verifikation zunächst Software-Module, anschließend integrierte Software bis hin zum integrierten System systematischen Tests unterzogen. Dies entspricht den ASPICE Prozessschritten SWE.4, SWE.5, SWE.6 und SYS.4 (s. Abb. 2.7). Im Allgemeinen beschreibt die ISO 9000 [46] die Verifikation als die Bereitstellung eines objektiven Nachweises, dass festgelegte Anforderungen erfüllt worden sind. Nach Schäuffele definiert sich die Verifikation mit der Anwendung in der Automobilentwicklung zu [96]:

Definition 3.1 (Verifikation). „Die Verifikation ist der Prozess zur Beurteilung eines Systems oder einer Komponente mit dem Ziel festzustellen, ob die Resultate einer gegebenen Entwicklungsphase den Vorgaben für diese Phase entsprechen. Software-Verifikation ist demnach die Prüfung, ob eine Implementierung

der für den betreffenden Entwicklungsschritt vorgegebenen Spezifikation genügt.“

Die Validierung, die mit zunehmender Verbreitung von Fahrfunktionen neben der Verifikation einen wachsenden Stellenwert einnimmt, hat das Ziel, für den Nutzer ein erwartungskonformes und konsistentes Systemverhalten sicherzustellen. Zusätzlich gilt es, eine tatsächliche Wirksamkeit im realen Straßenverkehr zu erzielen, sodass es von Bedeutung ist, das Gesamtsystem aus Fahrzeug, Fahrer und Umwelt zu betrachten [18]. Allgemein wird die Validierung in der ISO 9000 [46] als „die Bestätigung durch einen objektiven Nachweis, dass die Anforderungen für eine bestimmte Anwendung oder einen bestimmten Gebrauch erfüllt sind“, beschrieben. Bezogen auf die Automobilentwicklung gilt für die Validierung [96]:

Definition 3.2 (Validierung). „Die Validierung ist der Prozess zur Beurteilung eines Systems oder einer Komponente mit dem Ziel festzustellen, ob der Einsatzzweck oder die Benutzererwartungen erfüllt werden. Funktionsvalidierung ist demnach die Prüfung, ob die Spezifikation die Benutzeranforderungen erfüllt, also ob überhaupt die Benutzerakzeptanz durch eine Funktion erreicht wird.“

Bezogen auf die in dieser Dissertation als Prozessreferenz verwendeten ASPICE Prozessschritte (Abb. 2.7), findet sich die Funktionsvalidierung hinsichtlich der Benutzeranforderungen (aus SYS.2) im letzten Schritt der Systems Engineering Prozessgruppe (SYS.5) wieder.

Die Umsetzung der qualitätssichernden Maßnahmen im Rahmen der Verifikation und Validierung wird durch Testen erreicht. Im Bereich des Systems und Software Engineerings definiert die IEEE 24765 [47] die hier relevanten Begriffe wie folgt (übersetzt):

Definition 3.3 (Testen). Das Testen beschreibt eine Aktivität, bei der ein System oder eine Komponente unter spezifizierten Bedingungen ausgeführt wird,

die Ergebnisse beobachtet oder aufgezeichnet werden und eine Auswertung eines Aspekts des Systems oder der Komponente stattfindet.

Definition 3.4 (Testfall). Ein Testfall besteht aus Inputs, Bedingungen zur Durchführung sowie erwarteten Ergebnissen des Tests. Er wird mit einem bestimmten Ziel entwickelt, wie die Ausführung eines bestimmten Programmpfads oder die Überprüfung auf Konformität mit einer bestimmten Anforderung.

Definition 3.5 (System under test). Das System under test (SUT) ist der Teil des Computer-basierten Softwaresystems, das getestet werden soll.

Definition 3.6 (System). Ein System ist eine Sammlung aus wechselwirkenden Komponenten, die so organisiert sind, dass sie eine spezifische Funktion oder eine Reihe von Funktionen innerhalb einer spezifischen Umgebung erfüllen.

Definition 3.7 (Testumgebung). Die Testumgebung ist die notwendige Hard- und Software zur Durchführung des Testfalls.

Definition 3.8 (Testbett). Das Testbett ist eine Umgebung, die aus der Hardware, der Geräteausstattung, Simulatoren, Software-Tools sowie anderen unterstützenden Elementen besteht, die notwendig sind um einen Test durchzuführen.

Definition 3.9 (Testkriterium). Das Kriterium, das ein System oder eine Komponente erfüllen muss, um einen gegebenen Testfall zu bestehen.

Definition 3.10 (Testabdeckung). Der Grad, zu dem ein gegebener Testfall oder ein Satz von Testfällen alle spezifizierten Anforderungen für ein gegebenes System oder eine Komponente erfüllt.

Definition 3.11 (Funktionales Testen). Testen, das zur Evaluierung der Konformität eines Systems oder einer Komponente mit spezifizierten funktionalen Anforderungen durchgeführt wird.

Ergänzend dazu wird für diese Dissertation definiert:

Definition 3.12 (Ziel-Hardware). Unter der Ziel-Hardware wird die Hardware verstanden, die auch im Serienprodukt zum Einsatz kommt, inklusive der vorher notwendigen Entwicklungsversionen dieser Hardware.

In Anlehnung an die im Szenario-Kontext (s. Abb. 2.9) eingeführten Abstraktionsebenen, kann auch für den Testfall zwischen logischen und konkreten Testfällen unterschieden werden (s. Abb. 3.2). Der logische Testfall stellt eine um die Szenarioparameter abstrahierte Version des konkreten Testfalls dar. Diese Abstraktion wirkt sich vorteilhaft aus bei der Testfallspezifikation, der Testdurchführung sowie der anschließenden Auswertung.

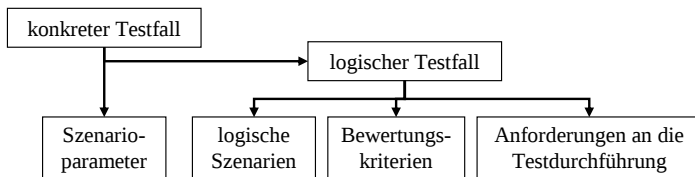


Abbildung 3.2: Aufbau und Bestandteile eines logischen und konkreten Testfalls (Darstellung nach [100])

Der Testfall besteht aus einem Szenario, in dem das SUT betrieben wird, und dem Testkriterium, dessen Erfüllung bei Vorliegen des gegebenen Szenarios geprüft wird. Um einen Testfall abzu prüfen, ist also zunächst das zugehörige Szenario herzustellen. Über eine Testautomatisierung kann das Szenario direkt hergestellt werden und der zugehörige Testfall überprüft werden. Alternativ besteht die Möglichkeit, das SUT kontinuierlich anzuregen und über einen Beobachter das Vorliegen von den oben beschriebenen Testszenarien zu überwachen.

Definition 3.13 (Teststimulation). Die Teststimulation beschreibt, auf welche Art das SUT angeregt wird, um Testfälle zu abzu prüfen. Je nach Testumgebung sind unterschiedliche Stimuli möglich.

Die beiden zusammengehörenden Regeln „kein Test ohne Anforderung“ und „zu jeder Anforderung mindestens ein Test“ stellen die Rückverfolgbarkeit von Testergebnissen zu Anforderungen sicher und unterstützen die vollständige Testabdeckung [94]. Einbetten lässt sich das Testen in den Testprozess, der in vier wesentliche Schritte untergliedert werden kann [101]. Ausgehend von einer Analyse des Testobjekts findet die Testfallgenerierung statt, auf die die Testdurchführung und Testauswertung folgen. Während der Testauswertung gewonnene Erkenntnisse können in die Testfallgenerierung zurückfließen und ermöglichen somit ein iteratives Vorgehen.

Im Gegensatz zum Testen, welches einer stark systematischen Herangehensweise unterliegt, hat die Erprobung einen explorativen Charakter des Ausprobierens. Beim Erproben spielt die subjektive Wahrnehmung des Menschen eine zentrale Rolle, während beim Testen die Wiederhol- und Reproduzierbarkeit von Vorgängen im Fokus steht [94].

Abschließend werde noch der Begriff der Repräsentativität im Kontext der Validierung eingeführt, dem in dieser Dissertation eine zentrale Bedeutung zukommt. Da die Validierung nach der obigen Definition die Überprüfung der Benutzerakzeptanz darstellt, ist es zielführend, dass im Validierungsprozess berücksichtigt wird, wie das SUT vom Benutzer beansprucht wird. Szenarien, in denen das SUT häufiger betrieben wird, kommt ein höheres Gewicht zu als selteneren Szenarien. Die Verteilung der Szenarienhäufigkeit wird beispielsweise durch geografische Faktoren oder auch das Nutzungsprofil bezüglich der SK, in denen das SUT zum Einsatz kommt, beeinflusst. Soll eine aggregierte Gesamtbewertung über alle Szenarien erfolgen, muss somit sichergestellt sein, dass die während der Validierung zugrunde gelegte Szenarienverteilung der Verteilung des Nutzungsprofils entspricht.

Definition 3.14 (Repräsentativität von Szenarien). Die Repräsentativität von Szenarien ist die (ggfs. quantifizierte) Zieleigenschaft, dass die Häufigkeitsverteilung der Szenarien in der Teststimulation der realen Szenarioverteilung beim Benutzer (möglichst genau) entspricht.

Bei simulativen Testmethoden wird das reale SUT und/oder die reale Systemumgebung durch Modelle ersetzt.

Definition 3.15 (Modell). Ein Modell ist eine vereinfachte, abstrakte Abbildung eines realen Systems, wobei das Modell nur einen begrenzten Verhaltensausschnitt des Originalsystems wiedergibt. Es wird zwischen verhaltensbeschreibenden Modellen (black box), strukturtreuen Modellen (white box) sowie Mischformen (grey box) unterschieden. [17]

Modelle sind zweckgebunden, da ein allgemeingültiges Modell nicht effizient wäre für spezielle Fragestellungen. Je umfangreicher ein Modell und je größer der abzubildende Verhaltensausschnitt, desto größer ist der Modellentwicklungsaufwand und der Simulationsaufwand. Daher wird aus einer gegebenen Aufgabenstellung zunächst der Modellzweck abgeleitet, der die Anforderungen an die Modellformulierung festlegt. Dabei dürfen Vereinfachungen gegenüber dem realen System nur derart sein, dass das Modell hinsichtlich des Modellzwecks gültig bleibt. [17]

Die Modellgültigkeit besagt, dass das Modellsystem das Originalsystem für den Modellzweck vertreten kann und kann durch den Nachweis der Verhaltensgültigkeit, der Strukturgültigkeit, der empirischen Gültigkeit sowie der Anwendungsgültigkeit belegt werden¹. Entsprechend dem Falsifikationsprinzip lässt sich die Richtigkeit eines Modells prinzipiell nicht beweisen. Daher wird statt der Richtigkeit von der Gültigkeit für einen konkreten Modellzweck gesprochen. [17]

Verhaltensbeschreibende Modelle sind Modelle des Verhaltens eines Systems, welches möglichst präzise nachgeahmt werden soll. Strukturtreue Modelle sind Modelle des eigentlichen Systems und versuchen die Systemstruktur nachzubilden. Sie haben den Vorteil, dass die vorhandene Strukturinformation den Datenbedarf zur Modellbildung reduziert. Soll mit einem Modell ein bisher noch nicht existierendes Verhalten simuliert werden, bietet sich ebenfalls ein strukturtreues Modell an. [17]

¹ Weitere Ausführungen zur Modellgültigkeit finden sich in der referenzierten Literatur.

Definition 3.16 (Untersuchungsziel). Das Untersuchungsziel beschreibt welche Fragen im Rahmen der Validierung beantwortet werden sollen. Dies können Metriken, wie z.B. die Verfügbarkeit oder die Fehlerhäufigkeit einer Fahrfunktion sein.

Definition 3.17 (Metrik). Eine Metrik ist eine objektive und messbare Größe, die verwendet wird, um Eigenschaften zu quantifizieren. Je nach Untersuchungsziel wird eine oder mehrere Metriken definiert.

3.2 Klassische Testmethoden

Viele im Entwicklungsprozess zum Einsatz kommende Methoden dienen gleichzeitig der Verifikation sowie der Validierung, sodass eine eindeutige Trennung bezüglich der Anwendung der jeweiligen Methode nicht immer möglich ist. In einem ersten Schritt werden daher zunächst die aus der Literatur gegebenen Verfahren für Verifikation und Validierung aufgenommen und die Eignung speziell für die Validierung im nächsten Schritt diskutiert.

Fahrfunktionen sind regelungstechnische Systeme, für deren Test die Rückkopplung der Systemausgänge über die Regelstrecke auf die Eingänge gegeben sein muss, um das System vollständig untersuchen zu können [94]. Daher ist der physische Test des SUT im Fahrzeug im Rahmen eines Feldtests² (FOT) nach wie vor von hoher Relevanz. Allerdings bringen nicht zuletzt die steigende Vernetzung zwischen den Systemkomponenten sowie der durch die Umwelt bedingte, große zu testende Zustandsraum, in dem sich das SUT befinden kann, neue Herausforderungen mit sich, die virtuellen Alternativen zum FOT mehr Bedeutung verschaffen [41].

In Abb. 3.3 ist eine reduzierte Variante des Mensch-Maschine-Systems mit geschlossenem Regelkreis (closed loop) aus Abb. 2.4 dargestellt. Je nach Repräsentation der vier Systembestandteile SUT, Fahrer, Fahrzeug und Umwelt können unterschiedliche Testumgebungen charakterisiert werden.

² Engl. field operational test

XiL-Verfahren relativ zum V-Modell jeweils unterschiedlich sind, können die Szenarien, in denen das Gesamtsystem untersucht wird, oftmals durchgängig in den XiL-Stufen wiederverwendet werden [87].

		Systembestandteile			
Methoden/Testumgebungen		SUT	Fahrer	Fahrzeug	Umwelt
	MiL	S	S	S	S
	SiL	E	S	S	S
	HiL	R	S	R/E/S	S
	DiL	R/E	R	R/E	S
	ViL	R/E	R	R/E	R/E/S
	Prüfgelände	R/E	R/E	R/E	R/E
	Feldtest	R/E	R	R/E	R

Abbildung 3.4: Einordnung von XiL-Methoden hinsichtlich Systembestandteil und Realitätsnähe in real (R), emuliert (E) und simuliert (S)

Zur Einordnung der folgenden XiL-Verfahren findet sich in Abb. 3.4 eine Übersicht, welche Systembestandteile des Mensch-Maschine-Systems im jeweiligen Verfahren durch reale (R), emulierte (E) oder simulierte (S) Komponenten repräsentiert werden. In manchen Fällen sind je nach Ausprägungsform mehrere Umsetzungsformen möglich, die dann in den Feldern aufgelistet sind.

Model-in-the-Loop-Verfahren (MiL)

MiL-Verfahren unterstützen den Entwicklungsprozess entlang des System Designs (linker Ast im V-Modell). In dieser vor der Implementierung (A-SPICE SWE.3, Abb. 2.7) angeordneten Phase liegt noch keine funktionsfähige Software vor. Um dennoch eine Untersuchung der Spezifikation zu erlauben, wird im Rahmen des MiL ein Modell des SUT erstellt und in einer Simulationsumgebung getestet. Im Falle einer modellbasierten Entwicklung besteht bereits ein Simulationsmodell des SUT, das für das MiL verwendet werden kann. Daher sind alle Systembestandteile, wie in Abb. 3.4 gezeigt, simuliert. Je früher

im Projekt Fehler in der Spezifikation entdeckt werden, desto geringer sind die Kosten, die entstehen, um diese Fehler zu beheben [94].

Da zu diesem Zeitpunkt noch kein reales System vorliegt, sind die Anforderungen hinsichtlich der Genauigkeit der Simulationsverfahren noch recht gering [94]. Dadurch wird es möglich, das zukünftige System skalierbar in einer großen Zahl an Szenarien zu untersuchen und auch bereits erste quantitative Aussagen zum potenziellen Nutzen des Systems im Betrieb vorzunehmen.

Software-in-the-Loop-Verfahren (SiL)

Beim SiL-Testing werden ähnlich wie beim MiL alle Systembestandteile simuliert. Der Unterschied zum MiL besteht darin, dass das SUT nicht als Modell umgesetzt wird, sondern als *reale* Software. Da diese aber nicht auf der Zielhardware ausgeführt wird, sondern als Code auf einem Entwicklungsrechner in einer speziellen Entwicklungsumgebung läuft, wird das SUT in diesem Verfahren als *emuliert* (vgl. Abb 3.4) eingestuft [110]. Ähnlich wie beim MiL müssen alle Systembestandteile (Umwelt, Fahrer und Fahrzeug) in Form von Modellen mit einer dem Testziel angepassten Genauigkeit vorhanden sein. Daher muss für den Aufbau einer SiL-Prüfumgebung ein umfangreiches Expertenwissen existieren.

Dadurch, dass keine reale Hardware der Zielplattform verwendet wird, besteht keine Forderung nach Echtzeit und es kann ein künstlicher Zeitrahmen genutzt werden, der es ermöglicht, Tests jederzeit zu stoppen oder beschleunigt abzuspielen. Dadurch eignet sich das SiL-Verfahren insbesondere für die frühen Phasen des Testprozesses, da noch keine Hardware notwendig ist, aber mit einer hohen Testtiefe Fehler und Funktionslücken frühzeitig erkannt und kostengünstig behoben werden können [110].

Hardware-in-the-Loop-Verfahren (HiL)

Im Gegensatz zum SiL wird beim HiL erstmalig die reale Ziel-Hardware mit realen Ein- und Ausgangsschnittstellen verwendet. Dadurch müssen auch die

Interaktionen zwischen realen und simulierten Systembestandteilen und die Forderung nach Echtzeit berücksichtigt werden. Um mit den Diagnoseroutinen des SUT kompatibel zu sein, müssen über eine Restbussimulation die Outputs aller verbundenen Steuergeräte³ ebenfalls realistisch simuliert werden [70].

Je nach Integrationsstufe wird beispielsweise unterschieden zwischen dem Komponenten-HiL, dem System-HiL sowie dem Vehicle-HiL [54]. Daher sind in dem Feld *Fahrzeug* in Abb. 3.4 für das HiL-Verfahren alle Umsetzungsoptionen hinterlegt, da es je nach Integrationsstufe real, emuliert oder simuliert sein kann. Ein Beispiel für ein emuliertes Fahrzeug wäre eine prototypische Umsetzung des Fahrzeugs, das hinsichtlich einiger Kriterien vom Serienfahrzeug abweicht [109].

Je nach Erfordernis des Testziels können wahlweise auch einzelne Teile des Fahrzeugs real am HiL-Prüfstand verbaut werden, wie z.B. Teile der Aktorik, um ein möglichst realistisches Systemverhalten nachbilden zu können. Neben Funktionstests können auf dem HiL-Prüfstand zusätzlich das Diagnoseverhalten, das Netzwerk- und Kommunikationsverhalten sowie das Verhalten im Fehlerfall getestet werden [110].

Driver-in-the-Loop-Verfahren (DiL) und Fahrsimulator

Beim DiL-Prüfstand handelt es sich um einen Fahrsimulator. Im Fahrsimulator können für den Test von Fahrfunktionen vollständig reproduzierbare Randbedingungen hinsichtlich der durch den Fahrer wahrgenommenen Repräsentation der Umwelt hergestellt werden. Je nach Größe des Simulators ist es möglich, den Fahrerplatz inklusive der Bedien- und Anzeigeelemente bis hin zum gesamten Fahrzeug in den Simulator zu integrieren [110]. Durch die virtuelle Nachbildung der Umgebung durch Videos können die Szenen, in denen das System untersucht werden soll, künstlich erstellt und parametrisiert werden. Diese Reproduzierbarkeit kann genutzt werden, um Studien mit deterministischem

³ Über die Steuergeräte werden die in der Systemarchitektur (vgl. 2.13) strukturierten Funktionalitäten hardwaretechnisch umgesetzt.

Verhalten zur Untersuchung der Interaktion des Fahrers mit Fahrerassistenzsystemen durchzuführen [91][18].

Während der Fahrer bzw. Nutzer stets real am Versuch teilnimmt, kann das SUT auf der realen Hardware integriert sein, simuliert werden oder auf einem Entwicklungsrechner implementiert (emuliertes SUT) sein. Ebenso wird zwischen drei Varianten des DiL-Prüfstands unterschieden: statisch, dynamisch ohne Translation sowie dynamisch mit Translation. Wegen der unterschiedlichen Ausprägungsformen von SUT und Fahrzeug sind diese beiden Systembestandteile beide als *real* oder *emuliert* in der Übersicht in Abb. 3.4 eingetragen. [110]

Ähnlich wie bei Infotainment-Systemen spielt die subjektive Wahrnehmung des Nutzers auch bei FAS-Systemen eine zusätzliche Rolle [94]. Damit der Nutzer mit dem SUT und dem Fahrzeug interagieren kann, muss das Fahrzeug zumindest eine vereinfachte Mensch-Machine-Schnittstelle besitzen. Ziel der DiL-Tests ist die Absicherung der Kundenakzeptanz, die Bewertung des Fahrerverhaltens und der Test neuer Bedienkonzepte mithilfe von Probanden [110].

Ein Nachteil insbesondere von statischen Fahrsimulatoren ist die sogenannte Simulatorkrankheit, die Schwindel, Kopfschmerzen und Übelkeit hervorruft. Durch nicht vermeidbare Ungenauigkeiten in der Simulation kommt es zu einer Abweichung der vom Nutzer erwarteten und vom Simulator vorgegebenen Umgebungsreize. [14]

Innerhalb des Entwicklungsprozesses (vgl. 2.3) lässt sich der DiL-Test auf Systemebene entweder auf der Seite des System Designs (SYS.2) oder der des System Tests (SYS.5) einordnen.

Vehicle-in-the-Loop-Verfahren (ViL) und Prüfgelände

Der ViL-Prüfstand zielt darauf ab, die Vorteile von Fahrsimulatoren und FOT zu vereinen. Auf der einen Seite stehen die Reproduzierbarkeit und Sicherheit des Simulators, während sich der FOT durch die reale Fahrdynamik sowie das

reale Umfeld auszeichnet und zugleich in der Lage ist, die Simulatorkrankheit zu vermeiden [15].

Das Fahrzeug ist dabei real ausgeprägt und das SUT kann wahlweise real, simuliert oder auf einem Entwicklungsrechner integriert sein. Die Verkehrsteilnehmer werden simuliert und dem Fahrer realitätsnah in sein Sichtfeld eingeblendet [110]. Gleichzeitig werden die simulierten Verkehrsteilnehmer auf Objektebene in das Fahrsystem eingespeist [15]. Objektebene bedeutet in dem Fall, dass nicht die Sensor-Rohdaten als Austausch-Format dienen, sondern die daraus erkannten und von mehreren Sensoren fusionierten Verkehrsobjekte.

Je nach Projektzeitpunkt können für das ViL seriennahe Fahrzeuge oder Versuchsfahrzeuge zum Einsatz kommen [110], sodass auch innerhalb des Entwicklungsprozesses unterschiedliche Einsatzzeitpunkte möglich sind. Ähnlich wie beim DiL bieten sich die Schritte der Anforderungsanalyse (SYS.2) oder des Systemqualifizierungstests an (SYS.5).

Das Fahrzeug wird nicht im realen Straßenverkehr, sondern auf einer Fahrdynamikfläche oder einer anderen definierten Fläche auf einem Prüfgelände bewegt [15]. Dadurch eignet sich das Verfahren auch insbesondere für den Test von aktiven Sicherheitssystemen [110]. Damit ist der ViL-Test eine spezielle Ausprägung des allgemeineren Prüfgelände-Tests. Auf dem Prüfgelände besteht zusätzlich die Möglichkeit, künstliche Verkehrsobjekte einzubringen. Dies können aufblasbare Hindernisse sein oder automatisierte Fußgänger für den Test von aktiven Sicherheitsfunktionen. Außerdem können in einem bestimmten Umfang künstliche Witterungsbedingungen hergestellt werden, wie z.B. eine regennasse Fahrbahn durch künstliche Bewässerung, sodass die Umwelt als *emuliert* eingestuft werden kann [109].

Für die Versuche auf dem Prüfgelände kommen auch oftmals Lenk- und Bremsroboter zum Einsatz, die als künstlicher Ersatz für den realen Fahrer dienen, sodass der Fahrer entweder in realer oder emulierter Form vorliegen kann [109]. Dies erhöht die Reproduzierbarkeit der durchgeführten Versuche und die Sicherheit.

3.2.2 Feldtest (FOT)

Beim FOT wird in der Regel die reale Funktionssoftware auf der realen Hardware im realen Fahrzeug in einer realen Umgebung durch einen realen Fahrer getestet (vgl. 3.4). Dadurch zeichnet sich der FOT durch seine hohe Realitätsnähe aus. Sobald innerhalb des Produktentstehungsprozesses die ersten physischen Fahrzeuge aufgebaut werden, startet auch die Erprobung von Funktionen im realen Fahrzeug [92] und ermöglicht die ersten kundennahen Tests auf Gesamtfahrzeugebene [94]. Ziel dabei ist, zu überprüfen, ob das System den beabsichtigten Nutzen erfüllt und ob es im Praxiseinsatz unerwartete Reaktionen zeigt [39].

Um möglichst früh die Rückmeldung aus dem realen Straßenverkehr zu bekommen, können alternativ zum Serienfahrzeug auch Versuchsträger aufgebaut werden, die vergleichbare Eigenschaften hinsichtlich der Fahrdynamik besitzen und in die das SUT prototypisch integriert wird. In diesem Fall ist das SUT emuliert, da es nicht auf der finalen Hardware läuft und auch das Fahrzeug ist emuliert, da es nicht dem Serienstand entspricht. Da die Tests im realen Straßenverkehr und mit einem realen Fahrer durchgeführt werden, muss der Code eine ausreichend hohe Reife besitzen, um sicherheitskritische Situationen zu vermeiden [110].

Gleichzeitig bedeutet diese Realitätsnähe aber auch, dass viele Umwelteinflüsse, wie das Wetter (Sonneneinstrahlung, Effekte durch Regen, Temperatur) sowie die Konstellation und das Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer, zwischen den einzelnen Tests nicht reproduzierbar abgebildet werden können. Zusätzlich hat das stark vernetzte System aus mehreren Sensoren, Funktionen und Akteuren einen erhöhten Testbedarf für die Verifikation, der im FOT wirtschaftlich nicht realisierbar ist, sodass vermehrt virtuelle Methoden (vgl. 3.2.1) hinzugezogen werden [41].

Wegen der realen Umgebung dient der FOT aber häufig zeitgleich auch dem Aufzeichnen von Realdaten, die im Nachgang für eine Resimulation (vgl. 3.3.2) oder als Trainingsdaten für Anwendungen, die auf maschinellen Lernverfahren

basieren, verwendet werden.

Analog zum Testfall-Design in anderen Testumgebungen, wird über die gewählte Route der Testfahrt direkt auf die Verteilung von Szenarien Einfluss genommen, denen das SUT ausgesetzt wird. Durch eine gezielte Routenplanung und eine damit einhergehende Erhöhung der Szenariohäufigkeit, kann der notwendige Umfang an Testkilometern reduziert werden. Diese streckenbezogene Raffung wird durch Kriterien wie die Neuheit und den Beitrag der Szenarien gesteuert [39].

Eng verwandt mit dem FOT sind die Validierungsmethoden Gesamtfahrzeugerprobung sowie Naturalistic Driving Studies (NDS). Die Gesamtfahrzeugerprobung (vgl. 3.1) grenzt sich durch ein weniger systematisches Vorgehen im Vergleich zum FOT ab mit dem Fokus einer sehr kundennahen, subjektiven Untersuchung des Verhaltens des Gesamtsystems. Die NDS hat zum Ziel, natürliches Fahrverhalten aufzuzeichnen, ohne dass dabei Verfälschungen durch aktive Versuche entstehen. Im Gegensatz zu FOT und Erprobungsfahrten besitzen die Fahrer in der Regel kein systemspezifisches Expertenwissen und eine durchschnittliche Fahrausbildung. [60]

Eine Sonderform des FOT ist das Rapid Control Prototyping. Der Aufbau ist der gleiche wie beim FOT mit der Besonderheit, dass die zu untersuchende Software im Realfahrzeug auf einem künstlichen Steuergerät läuft [94]. Dadurch können prototypische Versionen des SUT frühzeitig im Entwicklungsprozess (vgl. 2.6) im realen Fahrzeug getestet werden, auch schon bevor ein entsprechendes Steuergerät existiert.

3.2.3 Probandenstudien und Objektivierung

Im Vergleich zum FOT ist es bei der Validierung auf dem Prüfgelände (vgl. 3.2.1) möglich, die durch das Umfeld gegebenen Randbedingungen beim Testen gezielt zu beeinflussen. Es können bestimmte, klinische und reproduzierbare Situationen erzeugt werden, die sich auch eignen, um subjektives Empfinden einer Objektivierung zu unterziehen. Dabei wird auf Basis der Erkenntnis-

se aus einer Probandenstudie ein Sollverhalten des SUT objektiv ermittelt, indem die subjektiven Bewertungen der Probanden zu einem kontextspezifischen Modell verarbeitet werden. Basis zur Bestimmung der objektiven Metriken können physikalische Größen wie die Beschleunigung und der Ruck des Ego-Fahrzeugs sein oder auch die Zeitlücke⁴ zu anderen Objekten. [12]

Solche Verfahren zur objektiven Komfortbewertung können zum Beispiel für die Fahrerassistenzsysteme ACC, LDWS und Spurwechselassistent⁵ (LCA) angewendet werden. Anhand einer Bewertungsskala wird dabei das Verhalten der Systeme hinsichtlich Komfort in der frühen Entwicklungsphase bewertet. Die Bewertung basiert auf der Abweichung des Systemverhaltens vom modellbasierten Sollverhalten. [44]

Das Prüfgelände eignet sich durch die Abwesenheit von störendem Straßenverkehr auch zur Durchführung von Probandenstudien hinsichtlich der generellen Einflussfaktoren auf den wahrgenommenen Komfort bei automatisierter Fahrt. In kann ein Einfluss des Ablenkungsgrads des Fahrers auf die Komfortwahrnehmung eines Fahrstreifenwechsels festgestellt werden [31]. Daher muss die Längs- und Querdynamik in einem automatisierten Fahrzeug adaptierbar sein, da der vom Insassen empfundene Fahrstil vom tatsächlichen abweichen kann. Ebenso bestehen unterschiedliche Anforderungen an die Dynamik der Manöver von Fahrfunktionen, die den Fahrstilen *Alltag*, *Komfort* und *Dynamisch* entsprechen [12].

3.3 Stand der Wissenschaft und Forschung für Validierungsmethoden

Mit steigendem Automatisierungslevel (Abb. 2.2) der zu entwickelnden Systeme stoßen die oben vorgestellten konventionellen Validierungsmethoden (FOT und XiL) an ihre Grenzen und reichen allein nicht mehr aus für die vollständige Validierung und Verifikation. Insbesondere der Sicherheitsnachweis für Systeme

⁴ Die Zeitlücke ist definiert als der Quotient aus dem räumlichen Abstand zwischen Ego- und Zielfahrzeug sowie der Längsgeschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs.

⁵ Engl. lane change assist

me mit Automatisierungsgrad SAE Level ≥ 3 stellt Forschung und Industrie vor neue Herausforderungen, da der menschliche Fahrer im Fahrbetrieb nicht mehr zeitlich uneingeschränkt als Rückfallebene zur Verfügung steht und somit die Verantwortung beim System liegt. Obwohl der Sicherheitsnachweis nicht Gegenstand dieser Dissertation ist, können die in dem genannten Kontext erforschten Methoden gegebenenfalls dennoch auf die Fragestellungen dieser Dissertation übertragen werden.

Wie eingangs gezeigt (s. Abb. 3.1), wächst mit modernen Fahrfunktionen der Zustandsraum, in dem sich das SUT befinden kann, vor allem wegen des deutlich komplexeren Umfelds, stark an. Hinter dem Begriff der Komplexität verbergen sich in diesem Fall zahlreiche Faktoren aus dem Fahrzeugumfeld, die das Verhalten des SUT potenziell beeinflussen können. Dazu gehören unter anderem Witterungsbedingungen, die Anzahl und Konstellation anderer Verkehrsteilnehmer wie Fußgänger, Fahrräder und motorisierte Fahrzeuge, aber auch die statische Szenerie.

Beim konventionellen, Anforderungs-basierten Testen werden im Rahmen der Spezifikation (SYS.2 in Abb. 2.7) Testfälle abgeleitet (vgl. 3.1), die in den unterschiedlichen Integrationsstufen der XiL-Verfahren und schlussendlich auch im FOT Anwendung finden. Mit der oben beschriebenen Explosion des Parameterraums⁶ und einer Vielzahl an möglichen Szenarien, ist ein Anforderungs-basiertes Testen nicht mehr durchführbar [101].

Ansätze aus dem aktuellen Forschungsgeschehen fokussieren sich daher häufig auf die Generierung von Szenarien als Basis für Testfälle, denen das SUT ausgesetzt wird, um die Vielzahl der in der Realwelt möglichen Zustände abbilden zu können. Dieses neue Paradigma lässt sich mit einer Vielzahl der vorgestellten klassischen Testmethoden (vgl. 3.2) kombinieren.

⁶ Eine Zahlenbeispiel soll diesen Sachverhalt verdeutlichen. Angenommen werden $n = 15$ relevante Parameter, die in je $k = 3$ Stufen variieren können. Wird davon ausgegangen, dass alle der sich ergebenden $k^n = 14.348.907$ Kombinationsmöglichkeiten getestet werden müssen und eine Testdurchführung 30 Sekunden dauert, so ergibt sich eine Gesamtestdauer von $\approx 13,6$ Jahren, was bereits einem Vielfachen der angestrebten Entwicklungszeit von etwa einem bis drei Jahren entspricht.

3.3.1 Szenario-basiertes Testen

Beim Szenario-basierten (vgl. 2.4) Testen wird eine Menge von Szenarien generiert, die als Ausgangsbasis für Testfälle dient. In den unterschiedlichen XiL-Verfahren werden die auf diese Weise erzeugten Testfälle angewendet, um das SUT zu validieren [10].

Datenbasiert		Wissensbasiert
real	virtuell	
- Unfalldatenbanken - Bei Prüfgeländetests aufgezeichnete Daten - Digitale Kartendaten - Realverkehrsdaten • Felddaten • FOT • NDS	- Verkehrssimulation - Fahrsimulator	Expertenwissen

Abbildung 3.5: Übersicht über Datenquellen zur Szenario-Generierung (Darstellung erweitert und angepasst nach [81])

Durch das Abspeichern der Szenarien in einer zentralen Datenbank können unterschiedliche Quellen zur Generierung von Szenarien berücksichtigt werden [121]. Bei der Szenariengenerierung wird zwischen datenbasierten und wissensbasierten Ansätzen unterschieden [71], die in Abb. 3.5 weiter aufgliedert werden. Expertenwissen kann modellbasiert, beispielsweise in Form von Domänen-Modellen und Graph-basierten Regelsätzen, abgespeichert werden und eignet sich dadurch auch für eine automatisierte Bestimmung der Testspezifikation [6][101].

Um Szenarien datengetrieben zu generieren, kommen entweder Realdaten oder Simulationsdaten [107] zum Einsatz. Wegen der Zugriffsmöglichkeiten auf die fahrzeuginterne Kommunikation können im FOT unkompliziert Daten aufgezeichnet werden, auf deren Basis dann Szenarien abgeleitet wer-

den [55][59][90][30][77][66]. Aus Unfalldatenbanken, wie beispielsweise GIDAS⁷, können direkt repräsentative und sicherheitskritische Verkehrsszenarien rekonstruiert werden [29].

Bei Daten aus dem FOT im realen Straßenverkehr hingegen liegt meist noch kein Indiz hinsichtlich der sogenannten Kritikalität vor. Die Kritikalität beschreibt in diesem Kontext die Relevanz eines Szenarios für das SUT hinsichtlich eines bestimmten Untersuchungsziels. Dabei wird oft der Sicherheitsnachweis als Untersuchungsziel des SUT betrachtet. Zur Bestimmung der Kritikalität wird das Zusammenspiel aus systemspezifischen Faktoren, wie dem verbauten Sensorset und dem implementierten Fahrverhalten des SUT, sowie der jeweils vorliegenden Verkehrssituation betrachtet. [79][80]

Damit auf Basis der erzeugten Testfälle eine breite Abdeckung der in der Realität vorkommenden Szenarien erreicht wird, sind bei der Szenarienextraktion in erster Linie die Szenarien von Relevanz, die einen großen Neuheitswert besitzen [5]. Der Neuheitswert beschreibt die Einzigartigkeit eines Szenarios bezogen auf bereits bestehende Testszenarien. Durch die Beschränkung auf Szenarien mit hoher Einzigartigkeit können Rechenzeiten bei der Simulation der resultierenden Testfälle reduziert werden [57]. Für eine tiefer gehende Übersicht zu Methoden zur Szenario-Selektion wird auf die Literatur verwiesen [80].

Innerhalb der Datenbank werden die aus den einzelnen Quellen extrahierten, konkreten Szenarien auf logische Szenarien mit den zugehörigen Parametern abstrahiert. Dadurch können Parameterverteilungen der einzelnen, logischen Szenarien ermittelt und der vollständige Zustandsraum beschrieben werden. Zur Durchführung der Tests werden aus der Datenbank heraus konkrete Testfälle erstellt, die in den einzelnen XiL-Verfahren getestet werden. [121][120]

⁷ German In-Depth Accident Study

3.3.2 Resimulation

Eine Alternative zum Extrahieren von logischen Szenarien aus den während des FOT aufgezeichneten Daten stellt die Resimulation dar. Bei der Resimulation werden die aufgezeichneten Messdaten inklusive der realen Umgebungsinformationen in einer XiL-Umgebung (vgl. 3.2.1) erneut abgespielt, um das SUT mit den notwendigen Inputs zu versorgen [4][88][119]. Dabei werden nicht einzelne Szenarien betrachtet, sondern die gesamte Aufzeichnung der Testfahrt.

Bei Steuerungen, die keinen geschlossenen Regelkreis besitzen (open loop control), haben die Ausgänge des SUT keinen Einfluss auf das Systemverhalten, sodass ein einfaches Abspielen der aufgezeichneten Daten möglich ist. Da bei solchen Systemen auch das Sollverhalten bekannt ist, kann das Systemverhalten automatisiert ausgewertet werden [54].

Bei Systemen mit geschlossenem Regelkreis (closed loop control) beeinflusst das Systemverhalten die Inputs des SUT, sodass die aufgezeichneten Daten ihre Gültigkeit verlieren, sobald sich das SUT anders verhält als in den aufgezeichneten Daten. Mit dem reaktiven Replay ist eine Verifikation und Validierung in der Resimulation für rein längsregelnde Systeme dennoch möglich. Dazu werden die zeitabhängig aufgezeichneten Messdaten, die insbesondere auch die realen Umfeldinformationen enthalten, anhand ihrer Ortsreferenz in streckenbezogene Daten übersetzt [4]. Dadurch ist bei diesem Verfahren der Input für die Fahrfunktionen besonders realitätsnah. Allerdings müssen alle Komponenten, die zum Schließen des Regelkreises notwendig sind, modelliert und in die Simulation eingebunden werden. Die Genauigkeit dieser Modelle bestimmt somit den Umfang der möglichen Anwendungen der Methode.

In einem nächsten Schritt kann die Simulation auch dahingehend erweitert werden, dass das Verhalten der Verkehrsobjekte aus den aufgezeichneten Daten gezielt manipuliert wird. Dazu wird aus diesen Daten anhand des Straßenlayouts sowie den beobachteten Objekt-Trajektorien ein Umgebungsmodell extrahiert, in dem Fahrzeugmanöver detektiert werden. Dadurch kann das Ver-

halten des SUT in weiteren Szenarien untersucht werden mit dem Ziel, kritische Situationen zu identifizieren [125]. Dadurch, dass bei der Resimulation auch längere, zusammenhängende Abschnitte getestet werden können, eignet sich dieses Verfahren besonders für längsplanende Systeme, die mit bis zu 3 km Strecke einen deutlich größeren Vorausschauhorizont benötigen als querplanende Systeme [2].

3.3.3 Virtuelle Testfahrt

Die Resimulation ist insofern limitiert, als dass nur die einmal im FOT aufgezeichneten Fahrten verwendet werden können. Sind noch keine Daten aus dem FOT verfügbar oder soll die Variation von Verkehrssituationen erhöht werden, eignet sich die virtuelle Testfahrt. Dabei erfolgt die Anregung des Systems nicht über aufgezeichnete Messdaten, sondern modellbasiert. Dazu wird eine virtuelle Umgebung erzeugt, in der sich das System anhand der Vorgaben aus einem stochastischen Fahrermodell bewegt [73].

Um die Ergebnisse der Testfahrt systematisch auswerten zu können, werden Szenarien identifiziert, denen die Bewertung des SUT zugeordnet wird [53]. Anhand der erkannten Szenarien wird auch sichergestellt, dass eine Reproduzierbarkeit möglich ist, im Falle eines entdeckten, unerwarteten Systemverhaltens.

3.3.4 Shadow Mode

Während beim Szenario-basierten Testen häufig nur die Bewegungsplanung untersucht wird, berücksichtigt der sogenannte Shadow Mode auch den Einfluss der maschinellen Wahrnehmung. Dafür wird das SUT auf einem realen Steuergerät in Fahrzeugen integriert, die sich im Feld bewegen. Je nach Skalierung können dies kleinere Flotten sein, wie eigene Fahrzeugflotten eines OEM oder größere Flotten, falls auf alle Kundenfahrzeuge zugegriffen wird.

Wie sich aus der Bezeichnung ableiten lässt, wird das SUT nur „im Schatten“ also passiv ausgeführt. Das bedeutet, dass das SUT mit realen Inputs aus der

im Fahrzeug verbauten Sensorik beaufschlagt wird, aber die Outputs des Reglers nicht mit der physischen Aktorik des Fahrzeugs verbunden sind. Um den Regelkreis dennoch schließen zu können, werden die verbleibenden Elemente der Wirkkette in Modellen abgebildet und mit den Outputs des SUT simuliert. Dadurch kann das Systemverhalten allerdings immer nur solange bewertet werden, wie sich die tatsächlich gefahrene Trajektorie und die des SUT nicht zu weit voneinander entfernen. [119]

Der Aufbau der Testumgebung des Shadow Modes entspricht der closed-loop Resimulation in einer HiL-Umgebung. Allerdings müssen beim Shadow Mode die Sensordaten nicht aufgezeichnet werden, sondern können direkt im Fahrzeug verarbeitet werden. Daher eignet sich das Verfahren besonders, um sehr seltene Szenarien zu identifizieren. In solchen Fällen wird über spezielle Trigger-Bedingungen der Shadow Mode aktiviert, um das Verhalten des SUT in der noch unbekannten Situation zu untersuchen. [52]

4 Neues Konzept zur Validierung prädiktiver Planungsalgorithmen

Im vorhergehenden Kapitel werden die aktuellen Test- und Validierungsmethoden systematisch analysiert und in den Stand der Wissenschaft und Technik eingeordnet. Reichen diese bestehenden Methoden bereits aus, um die sich aktuell in der Entwicklung befindlichen Fahrfunktionen zu validieren? Welche Herausforderungen können entstehen und was sind potentielle Ansätze, um diesen zu begegnen? Diese Fragen sollen im Folgenden beantwortet werden. Um die aktuellen Herausforderungen bei der Validierung abzuleiten, wird zunächst ein Blick auf den Aufbau und die Funktionsweise einer PCC (vgl. 2.6) geworfen. Aufgrund der zahlreichen Subfunktionen und der damit verbundenen Abhängigkeiten der Bewegungsplanungsalgorithmen von diversen Komponenten der Wahrnehmung, eignet sich diese Fahrfunktion in besonderem Maße, um daran exemplarisch die neuen Herausforderungen zu identifizieren. Gleichzeitig dient die PCC in Kapitel 6 als Anwendungsbeispiel für das Validierungskonzept, welches in Abschnitt 4.5 vorgestellt wird.

4.1 Abgeleitete Herausforderungen bei der Funktionsvalidierung

Die beschriebenen funktionalen Erweiterungen von prädiktiven Längsfunktionen erhöhen die ODD und somit die Verfügbarkeit der Fahrfunktion, da der Fahrer beispielsweise auch bei Änderung des gesetzlichen Tempolimits und bei Kurvenfahrt nicht eingreifen muss. Gleichzeitig bringt unter anderem die dafür notwendige erweiterte Umfelderkennung Herausforderungen bei der Va-

lidierung solcher Funktionen im Rahmen des Entwicklungsprozesses mit sich. Die vier wesentlichen Herausforderungen werden im Folgenden erläutert.

4.1.1 Erweiterte Umfelderkennung

Durch die zusätzlichen Abhängigkeiten der Fahrfunktionen von der Umfelderkennung verschiebt sich die Systemgrenze zunehmend über die physischen Grenzen des Fahrzeugs hinaus und durch den elektronischen Horizont sowie vernetzte Dienste sogar über die Sichtweite des Fahrers hinaus. Der daraus resultierende vergrößerte Zustandsraum des zu untersuchenden Systems führt zu einer Steigerung der Spezifikations-, Test- und Validierungsaufwände. Aus der logischen Systemarchitektur (vgl. 2.13) geht hervor, dass die innovativen Komponenten zur Planung der Längsbewegung in der regelungstechnischen Wirkkette zahlreiche Abhängigkeiten sowohl von den Fähigkeiten der eingehenden wahrnehmenden Komponenten, als auch von der Performance der Aktoren aufweisen.

Zusätzlich bedeutet die vorausschauende Funktionalität einen größeren algorithmischen Umfang, der entsprechend den Testaufwand erhöht. Gleichzeitig bieten die OEM auch die konventionellen Systeme weiterhin an, sodass allein durch zusätzliche Anzahl neuer Systeme mehr Aufwand beim Testen entsteht. Eine weitere Herausforderung ergibt sich durch die schwer quantifizierbare Unsicherheit der Umfeldsensorik. Diese führt dazu, dass vor allem bei der Applikation der Systeme eine ausreichend große Anzahl repräsentativer Szenari-

en¹ herangezogen werden muss, um eine Überanpassung² an konkrete Szenarien zu vermeiden [58].

4.1.2 Zunahme und Verteilung relevanter Szenarien

Unter der Annahme, dass für die Validierung des Systemverhaltens die im Fahrbetrieb beim Nutzer auftretenden Situationen und Szenarien mit ihren Eigenschaften und ihrer Häufigkeit bekannt sein müssen, ergibt sich eine weitere Herausforderung. Bedingt durch topografische Einflüsse ist bereits innerhalb eines Landes mit Unterschieden in der Gestaltung des Verkehrsstreckennetzes zu rechnen³, welche einen direkten Einfluss auf die von der Fahrfunktion zu bewältigenden Szenarien besitzt. In je mehr Regionen auf der Welt die Fahrfunktion freigegeben werden soll, desto größer ist das zu berücksichtigende Streckennetz mit seinen jeweiligen Besonderheiten.

Der mögliche Zustandsraum des Systems wird durch Einflüsse unterschiedlicher Witterungsbedingungen einerseits auf die Performance der Sensorik und andererseits auf das vom Fahrer erwartete Sollverhalten zusätzlich vergrößert. Weiter ist es denkbar, dass je nach Region unterschiedliche Gesetzgebungen im Straßenverkehr gelten und deren Einhaltung ebenfalls regionsabhängig ausgeprägt ist. Eine Fahrfunktion, die sich strikt an das gesetzlich vorgegebene Tempolimit hält, kann gegebenenfalls als störend wahrgenommen werden.

Die Zahl möglicher Szenarien wird zusätzlich vergrößert durch den Einfluss mehrerer, sich überschneidender Randbedingungen. Während sich das System beispielsweise in der Kurvenregelung befindet, kann sich gleichzeitig das Tem-

¹ Als Beispiel werde das funktionale Szenario „Kurvenfahrt“ einer PCC betrachtet, bei dem durch Applikation eine passende Kurvengeschwindigkeit gefunden werden soll. Kurven können durch mindestens acht Parameter charakterisiert werden, die sich auf die Wunschgeschwindigkeit auswirken (vgl. 4.1.4). Wird vereinfachend angenommen, dass all diese acht Parameter unabhängig voneinander sind und dass pro Parameter zehn Ausprägungen untersucht werden, so ergeben sich minimal 80 verschiedene konkrete Szenarien, die für eine statistische Aussage in mehrfacher Ausführung getestet werden müssen. Realistischer ist jedoch, dass einige der Parameter Abhängigkeiten voneinander aufweisen, sodass die Zahl notwendiger konkreter Szenarien exponentiell zunimmt.

² Engl. overfitting

³ Beispielsweise durch eine höhere Kurvendichte in bergigen Regionen

polimit und die Fahrbahnsteigung ändern und der bevorstehende Kreisverkehr bereits Einflüsse auf die geplante Geschwindigkeit besitzen, sodass sich mehrere Ereignisse überlappen, die eine Vergleichbarkeit von Szenarien erschweren.

4.1.3 Veränderung des Systemverbunds nach Marktfreigabe

Die Verwendung von Kartendaten und Informationen aus vernetzten Diensten in Form des elektronischen Horizonts trägt maßgeblich zu der vorausschauenden Fahrweise der prädiktiven Längsführung bei. Gleichzeitig entstehen dadurch Abhängigkeiten im Gesamtsystem, die sich auch nach den finalen Funktionstests und der darauf folgenden Auslieferung der Fahrzeuge an den Kunden (ab Meilenstein SOP⁴ (Beginn der Produktion) in Abb. 2.6) noch ändern können.

Werden die Kartendaten in regelmäßigen Abständen aktualisiert und in die Kundenfahrzeuge übertragen, entspricht das System nicht mehr dem Zustand, in dem es initial getestet und freigegeben wurde. Unter der Annahme, dass sich die Kartendaten mit jeder Aktualisierung lediglich verbessern, ist auch eine Verbesserung der für den Nutzer wahrnehmbaren Performance zu erwarten. Sofern aber die Qualität des Kartenmaterials nicht quantifiziert werden kann, ist auch die im Fahrzeug zu erwartende Qualität der Fahrfunktion unbekannt. Findet auf der anderen Seite keine Aktualisierung des Kartenmaterials statt, ist durch die stetige Anpassung und Erweiterung des Streckennetzes dennoch mit einer Änderung der Systemperformance zu rechnen. Einen ähnlichen Einfluss haben Daten aus vernetzten Diensten, die theoretisch auch nach Auslieferung des Fahrzeugs an den Kunden in ihrer Qualität variieren können.

4.1.4 Subjektive und kontextsensitive Komfortwahrnehmung

Eine weitere Herausforderung resultiert aus der Notwendigkeit auch in Freifahrt-Situationen eine angemessene Fahrgeschwindigkeit zu wählen, die gegebenenfalls unter der vom Fahrer eingestellten SG liegt, um sicher und komfortabel

⁴ Engl. start of production

beispielsweise Kurven, Abbiegungen und Kreisverkehre zu passieren. Nach dem Drei-Ebenen-Modell (Abb. 2.1) plant der menschliche Fahrer im nicht-automatisierten Modus die zukünftige Solltrajektorie anhand des von ihm wahrgenommenen Fahrraums (Straße, Verkehr und sonstiges Umfeld). Zahlreiche Studien untersuchen die subjektive Komfortwahrnehmung der Fahrzeuginsassen während der assistierten oder automatisierten Fahrt in Abhängigkeit unterschiedlicher Einflussfaktoren [31], [11], [12], [98]. Beispiele für diese Einflussfaktoren sind das gesetzliche Tempolimit, horizontale Krümmung, Breite und Steigung des Fahrstreifens, die Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche, die Witterung, die Bebauung und der Bewuchs in direkter Umgebung der Fahrbahn sowie das Vorhandensein von vorausfahrenden Objekten.

In der Regel können alleine schon wegen der im Fahrzeug fehlenden wahrnehmungstechnischen Bereitstellung nicht alle der oben genannten Faktoren für die assistierte oder automatisierte Fahrt berücksichtigt werden. Dennoch ist es das Ziel für möglichst viele der im Betrieb auftretenden Szenarien ein für den Nutzer möglichst zufriedenstellendes Verhalten zu erreichen.

Eine weitere Besonderheit von vorausschauenden Systemen mit elektronischem Horizont besteht in der Fähigkeit Informationen über vorausliegende Streckenabschnitte zu besitzen, welche der Nutzer noch nicht einsehen kann⁵. Reagiert das System bereits auf diese Informationen während dem Nutzer der bevorstehende Streckenverlauf unbekannt ist, kann der Nutzer das Systemverhalten nicht auf Korrektheit überprüfen. In solchen Situationen sinkt die Nachvollziehbarkeit und quasi auch die Beherrschbarkeit durch den Nutzer, da nicht eindeutig ist, ob er korrigierend eingreifen muss.

⁵ Beispielsweise durch Verdeckung hinter einer Kurve oder aufgrund der limitierten Sichtweite des menschlichen Auges, insbesondere bei widrigen Witterungsbedingungen oder Dunkelheit

4.2 Randbedingungen und Anforderungen an neue Validierungsmethoden

4.2.1 Bestehende Anforderungen an die Funktionsvalidierung

Aufbauend auf der Systembeschreibung der prädiktiven Längsführung (vgl. 2.6) als exemplarische assistierte oder automatisierte Fahrfunktion werden im Folgenden zunächst allgemeine Anforderungen und Randbedingungen für die Funktionsvalidierung definiert. Für konventionelle Fahrfunktionen existieren bereits folgende Anforderungen an Testverfahren, die auch für PCC anwendbar sind [94], [118], [3], [18]:

[Req1] Validität - Das Untersuchungsverfahren muss eine dem Untersuchungsziel (vgl. 3.1) angepasste Genauigkeit besitzen. Wird ein modellbasiertes Vorgehen angewendet, muss bei der Modellbildung (vgl. 3.1) eine ausreichend genaue Abbildung der für das Untersuchungsziel relevanten Aspekte des SUT stattfinden.

[Req2] Beobachtbarkeit - Werden Tests durchgeführt, müssen die für das Untersuchungsziel relevanten Größen zugänglich sein, also beobachtet werden können. Vor allem im Feldtest ist darüber hinaus darauf zu achten, dass die Messmethode möglichst keine Rückwirkungen auf das SUT besitzt.

[Req3] Nachverfolgbarkeit - Zu Beginn des Entwicklungsprozesses nach Automotive-SPICE (vgl. 2.3) werden Anforderungen erhoben (SYS.1), zu denen alle Verifikations- und Validierungsergebnisse rückverfolgbar sein müssen. Dadurch wird sichergestellt, dass die Umsetzung der spezifizierten Anforderungen systematisch überprüft werden kann.

[Req4] Reproduzierbarkeit - Damit Testergebnisse ein zuverlässiger Nachweis des Reifegrads eines Systems sind, muss die Reproduzierbarkeit sicher-

gestellt sein. Somit wird das Verwenden zufälliger Ergebnisse ausgeschlossen. Daher müssen die Randbedingungen bei der Durchführung der Tests so eindeutig formuliert sein, dass wiederholte Durchführungen deterministisch möglich sind.

[Req5] Regelmäßige Wiederholung - Da sich das System während der Entwicklung ständig ändert, ist eine regelmäßige Wiederholung der Verifikations- und Validierungsaufwände notwendig. Dadurch ist es möglich, ein zuverlässiges Reifegradtracking während der Entwicklung durchzuführen.

[Req6] Schnelle Verfügbarkeit der Ergebnisse - Um im Laufe des Entwicklungsprozesses schnell auf mögliche Fehler im System reagieren zu können, müssen die Ergebnisse der Testaktivitäten unmittelbar vorliegen. Dadurch können Analysen zur Identifikation der Fehlerursache und das anschließende Abstellen des Fehlers möglichst bis zum nächsten Release erfolgen.

[Req7] Analyse von Änderungen - Um die Wirksamkeit, aber auch ungewollte Nebenwirkungen von Änderungen an Teilen des SUT zu untersuchen, muss das Verfahren in der Lage sein Änderungen zu analysieren.

Darüber hinaus gilt folgendes übergreifendes Ziel:

[Req8] Ökonomisch - Sowohl finanzielles Budget als auch personelle Ressourcen sind im Entwicklungsprozess limitiert. Insbesondere falls die Verfahren regelmäßig wiederholt werden, sollen zeitlicher Aufwand und Kosten möglichst weit reduziert werden und maximal die im Projekt für die Validierung vorgesehenen Ressourcen verwendet werden.

4.2.2 Zusätzliche Anforderungen an die Funktionsvalidierung durch neue Herausforderungen

Weitere, neue Anforderungen ergeben sich zusätzlich aus den identifizierten Herausforderungen (vgl. 4.1) von prädiktiven Fahrfunktionen. Die Anforderungen bilden die Ausgangsbasis, um die Eignung bestehender Validierungsverfahren zu überprüfen sowie darüber hinaus neue Verfahren zu konzeptionieren.

[Req9] Repräsentativität und Abdeckung - Bei der Validierung der Fahrfunktion kann sich die ermittelte Funktionsperformance hinsichtlich der zu untersuchenden Kennwerte für verschiedene funktionale und auch konkrete Szenarien (s. Abb. 2.9) unterscheiden. Für die zu bestimmende Gesamtbewertung der Fahrfunktion gemäß Untersuchungsziel (vgl. 3.1) muss also berücksichtigt werden, in welcher Häufigkeit die jeweiligen konkreten Szenarien getestet werden, damit eine für den Endnutzer repräsentative Nutzung abgebildet wird (vgl. Repräsentativität 3.1).

[Req10] Gesamte Wirkkette - Es soll für ausgewählte Eingangsgrößen (je nach Untersuchungsziel) nicht von einer idealisierten Umfeld erfassung und -repräsentation (vgl. 2.2.3) ausgegangen werden, sondern von einer realen. Dabei entsteht aus den Ground-Truth-Szenarien eine fehlerinduzierte Repräsentation geringerer Genauigkeit, die die Ausgangsbasis für den Planungsalgorithmus darstellt. Fehler in der Onboard-Wahrnehmung sowie in der Kartendatenbasis finden dadurch Berücksichtigung.

[Req11] Langgestreckte Szenarien - Der große Vorausschauhorizont planender Fahrfunktionen (bis zu 3 km, vgl. 2.6.1) führt zu einer Überlappung von mehreren parallelen und sich kontinuierlich ändernden Umgebungseinflüssen, sodass sich Szenarien nicht generalisieren lassen. Auch solche Szenarien müssen von der Validierung abgedeckt werden.

[Req12] Subjektive Eindrücke - Die subjektiv geprägte Wahrnehmung des menschlichen Nutzers von Absolutgeschwindigkeiten und Beschleunigungen des SUT müssen bei der Validierung Berücksichtigung finden, um die Nutzungsqualität bewerten zu können (je nach Untersuchungsziel).

[Req13] Serienbegleitende Validierung - Da sich sowohl die Szenerie als auch Teile des SUT (durch die Nutzung externer Datenquellen) nach der finalen Marktfreigabe kontinuierlich ändern können, muss das Verfahren auch eine serienbegleitende und regelmäßig wiederholte Überprüfung der Nutzungsqualität ermöglichen.

[Req14] Einsetzbarkeit in früher Entwicklungsphase - Um schon während der Konzeptdefinition (vgl. 2.3) erste Einschätzungen zum benötigten und für den Nutzer hilfreichen Funktionsumfang der Fahrfunktion machen zu können, soll das Verfahren auch schon in frühen Entwicklungsphasen (vgl. Definitionsphase in Abb. 2.6) zum Einsatz kommen können.

Darüber hinaus gilt folgendes übergreifendes Ziel:

[Req15] Skalierbarkeit - Oft führt erst die Kombination von mehreren Anforderungen zu einem Zielkonflikt. Die Skalierbarkeit des Validierungsverfahrens soll als die Fähigkeit definiert werden, das Verfahren auf eine große Zahl von Szenarien in kurzer Zeit und unter geringen Kosten anzuwenden. Die Skalierbarkeit fasst somit den Zielkonflikt aus folgenden Anforderungen zusammen:

- [Req5] Regelmäßige Wiederholung
- [Req7] Analyse von Änderungen
- [Req8] Ökonomie
- [Req9] Repräsentativität und Abdeckung

Der gesamte Validierungsumfang ergibt sich als mathematisches Produkt aus dem Umfang pro Durchführung und der Anzahl der Durchführungen. Die Va-

lidierung muss erneut durchgeführt werden bei Änderungen des SUT (vgl. [Req5] und [Req7]) und bestimmt somit die Anzahl der Durchführungen. Der benötigte Umfang pro Durchführung wird als Anzahl an zu testenden Szenarien beschrieben und durch [Req9] beeinflusst.

4.3 Einordnung aktueller Validierungsmethoden

Anhand der abgeleiteten neuen Anforderungen (vgl. 4.2) wird untersucht, ob die aktuellen Verfahren (vgl. 3.2) sowie die neuen Ansätze aus der Forschung (vgl. 3.3) bereits ausreichen für die Validierung von Fahrfunktionen. Dabei wird hier der Fokus auf die zusätzlichen, neuen Anforderungen (vgl. 4.2.2) gelegt, da die bestehenden Anforderungen (vgl. 4.2.1) bereits durch die aktuell existierenden Validierungsmethoden abgedeckt werden. Ziel ist nun vielmehr, auch Lösungen für die Herausforderungen zu finden, die sich durch die neuartigen Fahrfunktionen ergeben (vgl. 4.1), wobei diese Lösungen stets als Ergänzung zu bereits bestehenden Verfahren (vgl. 3.2) gedacht sind.

Für den direkten Vergleich werden die neuen Anforderungen mit den Validierungsverfahren in einer Matrix bewertet (s. Abb. 4.1). Wegen der Implikationen des Testorts auf die Eigenschaften der betrachteten Validierungsverfahren sind die Verfahren zusätzlich unterteilt in die Testorte *Realfahrzeug* und *XiL*⁶, in denen das SUT jeweils untersucht wird. Verfahren, die eine Anforderung generell oder unter bestimmten Bedingungen erfüllen, sind mit einem „Y“, bzw. „(Y)“ gekennzeichnet. Verfahren, die eine Anforderung nicht erfüllen, sind durch ein „N“ markiert. Die Validierungsverfahren werden der Reihe nach wie in Abb. 4.1 aufgelistet diskutiert.

⁶ XiL bedeutet hier, dass ein oder mehrere Verfahren aus der Gruppe der XiL-Verfahren (vgl. 3.2.1) zum Einsatz kommt.

		Test-ort	Anforderungen						
			[Req09] Repräsentativität	[Req10] Gesamte Wirkkette	[Req11] Langgestreckte Szenarien	[Req12] Subjektive Eindrücke	[Req13] Serienbegleitende Validierung	[Req14] Frühe Entwicklungsphase	[Req15] Skalierbarkeit
Validierungsverfahren	Erprobungsfahrt im Straßenverkehr	Realfahrzeug	(Y)	Y	Y	Y	N	N	N
	Prüfgeländetest		N	Y	N	(Y)	N	N	N
	Shadow Mode in Flottenfahrzeugen		Y	(Y)	Y	(Y)	Y	(Y)	Y
	Probandenstudie im Straßenverkehr		N	(Y)	(Y)	Y	N	(Y)	N
	Anforderungs-basiertes Testen	XiL	N	(Y)	N	N	(Y)	Y	Y
	Probandenstudie Fahrsimulator (DiL)		N	N	(Y)	(Y)	N	Y	N
	Resimulation von Realerprobungsdaten		(Y)	(Y)	Y	N	(Y)	Y	N
	Virtuelle/digitale Testfahrt		N	N	Y	N	Y	Y	Y

Abbildung 4.1: Bewertung von Validierungsverfahren aus dem Stand der Wissenschaft und Technik (vgl. 3.3) hinsichtlich der identifizierten neuen Anforderungen. Legende: Y = Erfüllung der Anforderung möglich, (Y) = Erfüllung der Anforderung mit Einschränkung(en) möglich, N = Erfüllung der Anforderung nicht möglich.

4.3.1 Verfahren am Testort Realfahrzeug

Der klassischen Validierung im Realfahrzeug fällt nach wie vor eine bedeutende Rolle zu, da dort die Möglichkeit besteht, die gesamte Wirkkette [Req10] integriert im Fahrzeug zu betrachten und gleichzeitig subjektive Eindrücke [Req12] der Testperson zu berücksichtigen. Alle Verfahren, die ein dediziertes Entwicklungsfahrzeug inklusive des ausgebildeten Fahrers benötigen, erfüllen die hier definierte Anforderung nach Skalierbarkeit [Req15] nicht.

Erprobung im realen Straßenverkehr

Bei der Erprobung im realen Straßenverkehr (vgl. 3.2.2), beinhaltet der Versuchsaufbau ausschließlich Systembestandteile in realer oder emulierter Form (nach Tabelle 3.4). Ob die erlebten Szenarien während der Erprobungsfahrt repräsentativ für das Verhalten der Nutzer [Req9] sind, hängt letztlich von der gewählten Erprobungsrouten und der Interaktion zwischen Testfahrer und SUT ab. Um möglichst viele Anwendungsfälle während der in der Länge begrenzten Fahrt unterzubringen, werden bestimmte Szenarien bevorzugt erprobt, auch wenn diese beim Anwender nur eine geringe Auftretenshäufigkeit besitzen. Daher ist diese Anforderung nur bedingt erfüllt (markiert in der Matrix mit (Y)). Auch die serienbegleitende Validierung [Req13] ist für die Vielzahl an unterschiedlichen Baureihen und Fahrfunktionen auf verschiedenen Architekturen, die in den letzten Jahren in Serie gebracht wurden, anhand von Erprobungsfahrten in physischen Fahrzeugen nicht abbildbar.

Prüfgeländetest

Beim Prüfgeländetest (vgl. 3.2.1) werden konkrete Szenarien unter klinischen Bedingungen gezielt getestet. Daher sind die subjektiven Eindrücke des Fahrers [Req12] in diesen Situationen nur bedingt auf die Verhältnisse im realen Straßenverkehr übertragbar und es liegt keine repräsentative Szenarioverteilung [Req9] vor. Zusätzlich können auch keine langgestreckten und sich überlappenden Szenarien [Req11] auf dem räumlich begrenzten Prüfgelände ab-

gebildet werden. Genauso wie beim Feldtest müssen zunächst reale und bewertbare Fahrzeuge aufgebaut werden. Daher eignen sich diese Verfahren auch nicht für Untersuchungen in der frühen Entwicklungsphase [Req14].

Shadow Mode in Flottenfahrzeugen

Beim Shadow Mode (vgl. 3.3.4) werden keine dedizierten Validierungsfahrten mit Erprobungsfahrzeugen durchgeführt, sondern das SUT läuft „im Schatten“ auf sich im Feld befindlichen Fahrzeugen, wie z.B. Kundenfahrzeuge oder Dienstwagenflotten. Dadurch skaliert das Verfahren deutlich besser als der Feldtest, da keine Erprobungsfahrzeuge aufgebaut werden müssen und die Fahrten auch nicht selber durchgeführt werden [Req15].

Diese Methode hat das Potenzial, dass das Umfeld, dem das SUT bei der Validierung ausgesetzt ist, quasi identisch ist mit dem Umfeld, in dem der Nutzer das SUT betreiben wird, sodass von einem hohen Grad an Repräsentativität [Req9] ausgegangen werden kann. Allerdings wird der Regelkreis im Shadow Mode nicht geschlossen, sodass die volle Funktionalität der Planung und Regelung nur auf kurzen Zeithorizonten im Rahmen einer im Fahrzeug laufenden MiL-/SiL-Simulation untersucht werden kann.

Da sich die Shadow Mode-Fahrzeuge regelmäßig im Feld befinden, kann die Validierung auch schon in der frühen Entwicklungsphase [Req14] gestartet sowie nach SOP serienbegleitend [Req13] fortgeführt werden. Sofern die Fahrzeuge bereits mit Wahrnehmungskomponenten ausgestattet sind, die dem finalen zu validierenden System ausreichend ähnlich sind, wird zudem die Anforderung [Req10] zumindest teilweise erfüllt, da die Wirkkette bis auf die Aktorik abgebildet wird.

Probandenstudien im Straßenverkehr

Wie beim Feldtest kann bei der Probandenstudie (vgl. 3.2.3) ebenfalls ein reales Fahrzeug zum Einsatz kommen, was die Anforderung [Req10] unterstützt. Allerdings ist das Ziel der Probandenstudie, mit einer hinreichend großen

Stichprobe von Probanden subjektive Bewertungen [Req12] zu erhalten. Durch diese Abhängigkeit von den Probanden skaliert das Verfahren nicht [Req15]. Damit in Zusammenhang stehend kann aufgrund des geringen Testumfangs nicht von einer Repräsentativität [Req9] der getesteten Szenarien ausgegangen werden.

4.3.2 Verfahren am Testort XiL

Die XiL-Verfahren (vgl. 3.2.1) unterscheiden sich hinsichtlich der Umsetzung (real, emuliert oder simuliert) der einzelnen Systembestandteile (vgl. Tabelle 3.4). Bei den hier betrachteten Validierungsverfahren wird zusätzlich anhand der Teststimulation (vgl. 3.1) der jeweiligen Methoden unterschieden und anhand dessen die vier betrachteten Verfahren (s. Abb. 4.1) identifiziert. Diese Validierungsverfahren stellen also eine konkrete Kombination aus einer bestimmten Stimulationsart und einem oder mehreren XiL-Verfahren dar. Wegen des simulierenden Charakters eignen sich alle hier betrachteten Verfahren prinzipiell auch für Untersuchungen in der frühen Entwicklungsphase [Req14], da kein physisches Fahrzeug aufgebaut werden muss.

Anforderungs-basiertes Testen am XiL

Das Anforderungs-basierte Testen (vgl. 3.3) am XiL (vgl. 3.2.1) fasst die gängigen Testaktivitäten zusammen, mit denen in erster Linie die Verifikation des SUT (vgl. 3.1) durchgeführt wird, also der Abgleich mit der jeweils vorgegebenen Spezifikation. XiL-Methoden, die reale Systembestandteile enthalten, sind in der Regel an die Echtzeit gebunden und können wegen der Kosten für physische Komponenten im Versuchsaufbau nicht beliebig parallelisiert werden. Das ViL enthält ein physisches Fahrzeug (real/emuliert) und skaliert daher nicht ([Req15] nicht erfüllt). Der DiL-Prüfstand (vgl. 3.2.1) wird durch die Echtzeitanforderungen und die Anzahl der eingesetzten Testpersonen limitiert. Der HiL-Prüfstand (vgl. 3.2.1) ist ebenso an die Echtzeit gebunden und verursacht Hardware-Kosten pro verwendeter Instanz ([Req15] nicht erfüllt).

Von den betrachteten XiL-Methoden (vgl. 3.2), erfüllen lediglich MiL und SiL (vgl. 3.2.1) die geforderte Skalierbarkeit, da dort alle Systembestandteile (SUT, Fahrer, Fahrzeug und Umwelt) simulativ oder ggfs. emuliert repräsentiert werden. Da beim Anforderungs-basierten Testen aber gezielt einzelne Szenarien unabhängig voneinander getestet werden, erfüllt die Teststimulation nicht die Anforderungen nach Repräsentativität [Req9] und die Möglichkeit langgestreckte Szenarien [Req11] zu testen, wie es für die Validierung nötig wäre.

Probandenstudien im Fahrsimulator

Im Fahrsimulator (vgl. 3.2.1) werden gezielt zusammenhängende Sequenzen einzelner Fahrszenarien getestet, sodass langgestreckte Szenarien [Req11] unter Einschränkungen möglich sind. Dadurch, dass ein realer Mensch zum Einsatz kommt, können auch subjektive Eindrücke [Req12] zumindest zu bestimmten Fragestellungen gesammelt werden. Durch die Abhängigkeit von der Versuchsperson skaliert dieses Verfahren aber nicht [Req15] und kann auch nicht für die serienbegleitende Validierung [Req13] eingesetzt werden.

Resimulation

Die Resimulation (vgl. 3.3.2) kombiniert Vorteile des Feldtests im Straßenverkehr mit denen der MiL-/SiL-Simulation (vgl. 3.2.1 sowie 3.2.1). Durch die Aufzeichnung der Umfelddaten während eines realen Feldtests (vgl. 3.2.2), ist die Validität der Umfelderkennung [Req1] sichergestellt und es ergeben sich im Realverkehr automatisch langgestreckte Szenarien [Req11]. Die Resimulation der Fahrfunktion anhand der aufgezeichneten Daten erlaubt eine reproduzierbare [Req4] und regelmäßige Wiederholung der Analysen [Req5], die auch genutzt werden können, um Änderungen in der Funktionssoftware zu bewerten [Req7]. Durch die computerbasierte Auswertung sind die Ergebnisse unmittelbar nach Durchführung der simulativen Analysen verfügbar [Req6].

Um auch das simulierte Systemverhalten subjektiv bewerten [Req12] zu können, sind jedoch objektivierende Modelle notwendig, die nicht immer vor-

liegen. Die Repräsentativität und Abdeckung [Req9] untersuchter Szenarien hängt unmittelbar von den Eigenschaften der aufgezeichneten Messdaten ab. Ebenso kann die Resimulation bereits in frühen Entwicklungsphasen [Req14] zum Einsatz kommen, sofern bereits aufgezeichnete Umfeld- und Fahrzeugdaten von einem vergleichbaren vorangegangenen Projekt⁷ vorhanden sind. Die Abhängigkeit von in der Realität während eines Feldtests aufgezeichneten Daten limitiert die Skalierbarkeit [Req15]. Insbesondere durch Änderungen im Streckennetz können aufgezeichnete Daten nicht beliebig lange verwendet werden, ohne die Repräsentativität [Req9] der erzeugten Ergebnisse einzuschränken.

Virtuelle Testfahrt

In der virtuellen Testfahrt (vgl. 3.3.3) wird ebenfalls die MiL-/SiL-Simulation mit den einhergehenden Vorteilen genutzt. Damit das Verfahren die Anforderung nach Reproduzierbarkeit [Req4] erfüllt, müssen die generierten Szenarien allerdings deterministischer Natur sein. Die Repräsentativität [Req9] hängt maßgeblich von der Ausgestaltung der definierten Szenarien ab. Wegen der fehlenden spezifischen Modelle für die Wahrnehmungskomponenten kann kein repräsentatives Bild des Verhaltens der gesamten Wirkkette [Req10] erzeugt werden.

Da auch nicht indirekt reale Systembestandteile involviert sind (keine aufgezeichneten Erprobungsdaten notwendig), skaliert die virtuelle Testfahrt besser als die Resimulation. Gleichzeitig muss allerdings sichergestellt werden, dass die definierten Szenarien auch die Eigenschaften der Umfeldwahrnehmung berücksichtigen und somit die Validität [Req1] einbeziehen.

⁷ Ein vergleichbares Projekt ähnelt sich in der Systemarchitektur (s. Abb. 2.13). Sind die gleichen Systemkomponenten mit der dazugehörigen Signalkommunikation zwischen diesen Komponenten verfügbar, dann können diese Daten auch für ein verwandtes Projekt Verwendung finden.

4.4 Offene Herausforderungen bei der Validierung

Die Diskussion der Validierungsverfahren hinsichtlich ihrer Eignung für die Validierung von Fahrfunktionen anhand der zuvor definierten Anforderungen (vgl. 4.2) zeigt, dass keines der betrachteten Verfahren direkt angewendet werden kann. Vielmehr scheint es, dass die Kombination der komplementären Eigenschaften mehrerer Verfahren erfolgversprechend sein könnte.

Nur drei der betrachteten Verfahren (s. Abb. 4.1) erfüllen die Anforderungen nach Skalierbarkeit [Req15]. Da dieses Kriterium zentral für die in Abschnitt 4.1 formulierten Herausforderungen ist, rücken diese drei Verfahren in den näheren Fokus.

Der Shadow Mode (vgl. 4.3.1) erfüllt vier Anforderungen vollständig sowie die restlichen drei Anforderungen zumindest bedingt. Dennoch soll das Verfahren im Rahmen dieser Dissertation nicht weiter betrachtet werden, da es voraussetzt, dass der OEM bereits Zugriff auf eine sich im Feld befindliche Fahrzeugflotte besitzt, die folgende Voraussetzungen mitbringt:

- Ausstattung mit einem dem SUT funktional ähnlichen Sensorset
- Ausstattung mit Steuergeräten, auf die nach SOP, also während der Verwendung, Softwarekomponenten zur MiL/SiL-Simulation integriert und konfiguriert werden können
- Ausstattung mit einer Schnittstelle, um die Ergebnisse der Validierung an die Entwicklungsabteilung zurückzusenden
- Ausreichend große Abdeckung⁸ der Fahrzeuge in den jeweils relevanten Regionen

⁸ Eine Quantifizierung der benötigten Zahl an Fahrzeugen wird hier nicht vorgenommen. Es wird angenommen, dass einzelne Fahrzeuge in der Kundenflotte nur einen vernachlässigbar kleinen Teil des gesamten Streckennetzes befahren. Diese Routen werden dafür aber häufiger befahren, wie bspw. Pendelstrecken zwischen Wohnort und Arbeitsort. Um dennoch eine ausreichend große Abdeckung des Streckennetzes zu erreichen, sind entsprechend viele Fahrzeuge nötig.

Das Anforderungs-basierte Testen (vgl. 4.3.2) weist in Kombination mit einer MiL- oder SiL-Umgebung ebenfalls die nötige Skalierbarkeit auf, soll hier aber auch nicht betrachtet werden, da dabei der Fokus auf Verifikationsaufgaben und weniger auf der Validierung liegt.

Die verbleibende virtuelle Testfahrt (vgl. 4.3.2) eignet sich alleine schon wegen der Teststimulation besser für Validierungsaufgaben. Allerdings erfüllt sie nicht die Anforderung nach Repräsentativität, da die Szenarien, in denen das SUT simuliert wird, über stochastische Modelle erzeugt werden (vgl. 3.3.3). Da nicht die gesamte Wirkkette abgedeckt wird, kann auch keine Aussage über die Verteilung von Fehlern in der Wahrnehmung getroffen werden und auch subjektive Eindrücke der Nutzer werden noch nicht abgedeckt.

4.5 Neuartiger Ansatz zur Validierung

Die Erkenntnisse aus der Anforderungsanalyse motivieren den Ansatz, das Verfahren *virtuelle Testfahrt* dahingehend zu erweitern, dass es auch für die hier genannten Problemstellungen einen Mehrwert liefern kann.

Ein ähnlicher Ansatz lässt sich aus dem Bereich Energiemanagement im Gesamtfahrzeug übertragen. Für die Entwicklung der Algorithmen zur Reichweitenprädiktion im Zusammenspiel mit der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge existiert ein MiL-Simulationsframework, bei dem wesentliches Gewicht auf repräsentative Routen gelegt wird, auf denen das SUT virtuell untersucht wird [112]. Dieser Anwendungsfall ähnelt dem hier betrachteten insofern, als dass es sich ebenfalls um eine prädiktive Funktionalität handelt und die vom Nutzer wahrgenommene Güte des SUT gleichermaßen von Einflussfaktoren außerhalb des Fahrzeugs abhängen kann.

4.5.1 Repräsentative Validierung von Fahrfunktionen mit virtuellen Testfahrten

Vor diesem Hintergrund wird die Grundidee von virtuellen Testfahrten auf realen Routen übernommen und auf die Fragestellung dieser Dissertation ange-

passt. Das sich daraus ergebende, konfigurierbare Framework beinhaltet ein mehrstufiges Vorgehen, an dessen Ende aggregierte Metriken zur Validierung des SUT ausgegeben werden (s. Abb. 4.2). Dieses Framework hat das Ziel, bestehende Validierungsverfahren, wie beispielsweise den FOT (vgl. 3.2.2), zu ergänzen und explizit Fragestellungen zu beantworten, die andere Verfahren wegen der offenen Herausforderungen (vgl. 4.4) nicht ausreichend adressieren.

Definition 4.1 (Repräsentative virtuelle Testfahrt). Die repräsentative virtuelle Testfahrt (RVT) ist eine virtuelle Testfahrt, bei der die speziell gewählten Routen zur Stimulation derart ausgeprägt sind, dass die Szenariohäufigkeit in der Simulation repräsentativ für das abzubildende Nutzerverhalten ist.

Das abgebildete RVT-Framework (s. Abb. 4.2) ist mit seiner technischen Struktur bewusst generell gehalten, um die Anwendbarkeit nicht auf die hier als Motivation genutzte PCC zu beschränken. Im ersten Schritt wird ein Satz virtueller Routen erzeugt [F1]. Entlang dieser virtuellen Routen wird die Fahrfunktion in den Schritten [F2] bis [F6] sequenziell analysiert. Dazu wird zunächst für die konkrete virtuelle Route ein Umgebungsmodell bereitgestellt [F2], welches den Input für die MiL-Simulation [F3] bildet und auf digitalen Kartendaten basiert, die skalierbar für alle Streckenabschnitte vorliegen. Nach erfolgter Simulation werden die für den Anwendungsfall relevanten Szenarien extrahiert [F4], die eine Bewertung der Einzelfahrt anhand von definierten Metriken erlauben [F5]. Dabei werden die konkreten Szenarien inklusive Metainformationen extrahiert und diese zu logischen sowie funktionalen Szenarien (vgl. 3.3.1) referenziert. Eine Datenbank [F6] dient als zentraler Zwischenspeicher für die extrahierten, konkreten Szenarien inkl. der zugehörigen Metriken.

Sobald alle virtuellen Routen in der Schleife abgearbeitet sind, findet eine Aggregation der Metriken [F7] statt, indem die Szenarien aus der Datenbank gefiltert und zusammengefasst werden, bevor die Ergebnisse schließlich in interaktiven Dashboards visualisiert werden [F8]. Darüber hinaus können die Szenarien in der Datenbank für tiefer gehende Analysen, wie bspw. Korrelationsanalysen und Clustering herangezogen werden.

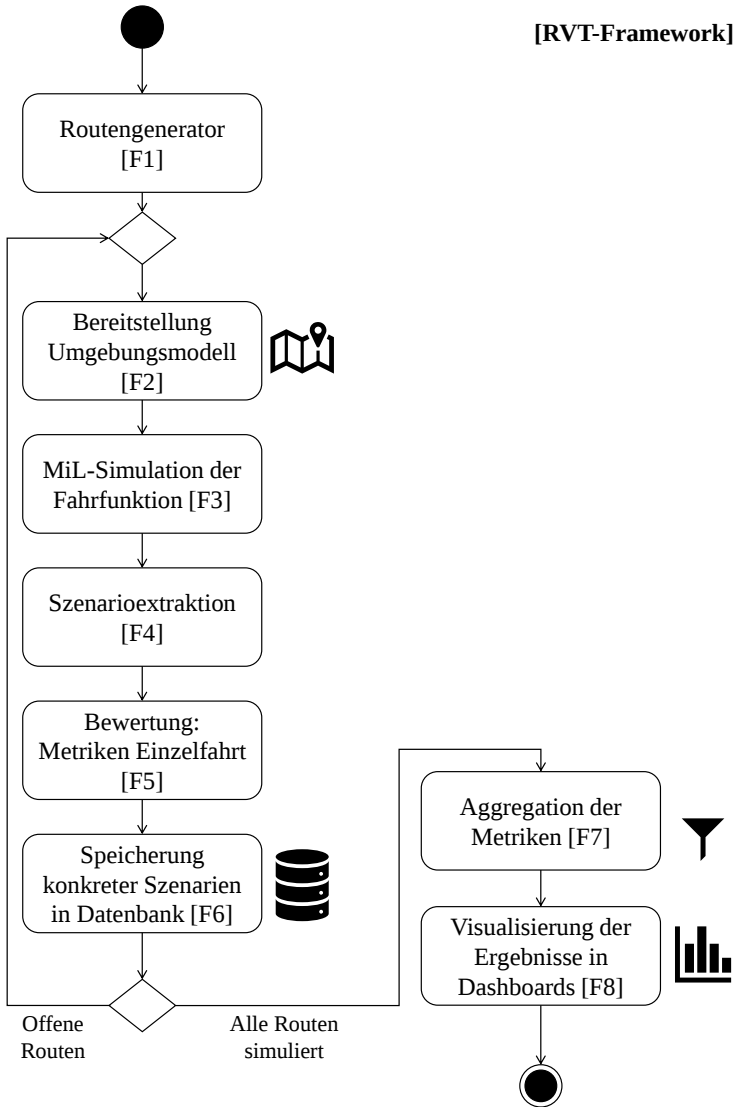


Abbildung 4.2: Technische Struktur des RVT-Frameworks zur skalierbaren Funktionsvalidierung mit repräsentativer Szenarioverteilung mittels virtueller Testfahrt

4.5.2 Anwendung des Konzepts auf Fahrfunktionen

Das RVT-Framework wird im Rahmen der Systementwicklung (vgl. „SYS“ in Abb. 2.7) für automatisierte Fahrfunktionen von einem Systementwickler⁹ als Muster verwendet, um darauf basierend eine für den Anwendungsfall spezifische Simulationskette zu entwickeln und diese anschließend anzuwenden. Die notwendigen Schritte sind in einem operativen Prozess (s. Abb. 4.3) zusammengefasst. Dieser Prozess besteht aus einem Entwicklungsprozess [EAP.1], der vorbereitend und einmalig ausgeführt wird, sowie einem iterativen Anwendungsprozess (Schritte [EAP.2], [EAP.3] und [EAP.4]), der bei Bedarf mehrmals ausgeführt wird. Während der Schritt [EAP.1] in Zusammenarbeit der Rollen Systementwickler (SE), Simulationsingenieur (SI) und Data Scientist (DS) durchgeführt wird, wird der anschließende Anwendungsprozess allein durch den SE verantwortet, der das Anwendungsfall-spezifische Wissen mitbringt.

Entwicklungsprozess der RVT-Simulationskette anhand des V-Modells [EAP.1]

Das V-Modell nach Automotive-SPICE (s. Abb. 2.7) dient als Referenzprozess für die System- und Softwareentwicklung im Automobilbereich. Die grundsätzliche Struktur lässt sich aber ebenso auf die Entwicklung von Simulationssystemen anwenden, die als Werkzeug für die automobilen Systementwicklung dienen.

Die *Systems Engineering* (SYS) Prozessgruppe wird vom SE übernommen und entlang der fünf Schritte SYS.1 bis SYS.5 bearbeitet (s. Abb. 4.4). Für die Anforderungserhebung (SYS.1) dient das Untersuchungsziel (vgl. 3.1) als zentraler Input. Bei der Erstellung der Simulationsmodelle wird die benötigte Genauigkeit ebenfalls an das Untersuchungsziel geknüpft. Auch die geforderten Metriken leiten sich aus den Untersuchungszielen ab. Bei der Konfiguration

⁹ Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung der Sprachformen männlich, weiblich und divers (m/w/d) verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

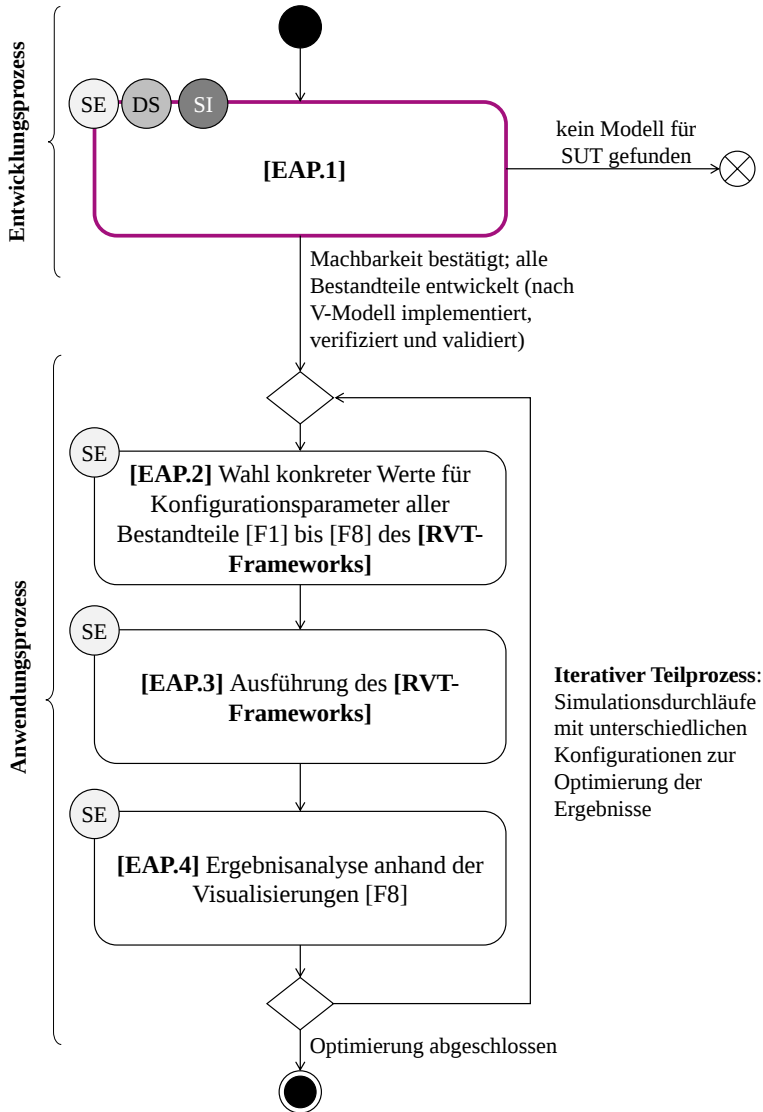


Abbildung 4.3: Entwicklungs- und Anwendungsprozess für Simulationen basierend auf dem RVT-Framework (s. Abb. 4.2) für die Validierung automatisierter Fahrfunktionen mit den Rollen Systementwickler (SE), Simulationsingenieur (SI) sowie Data Scientist (DS).

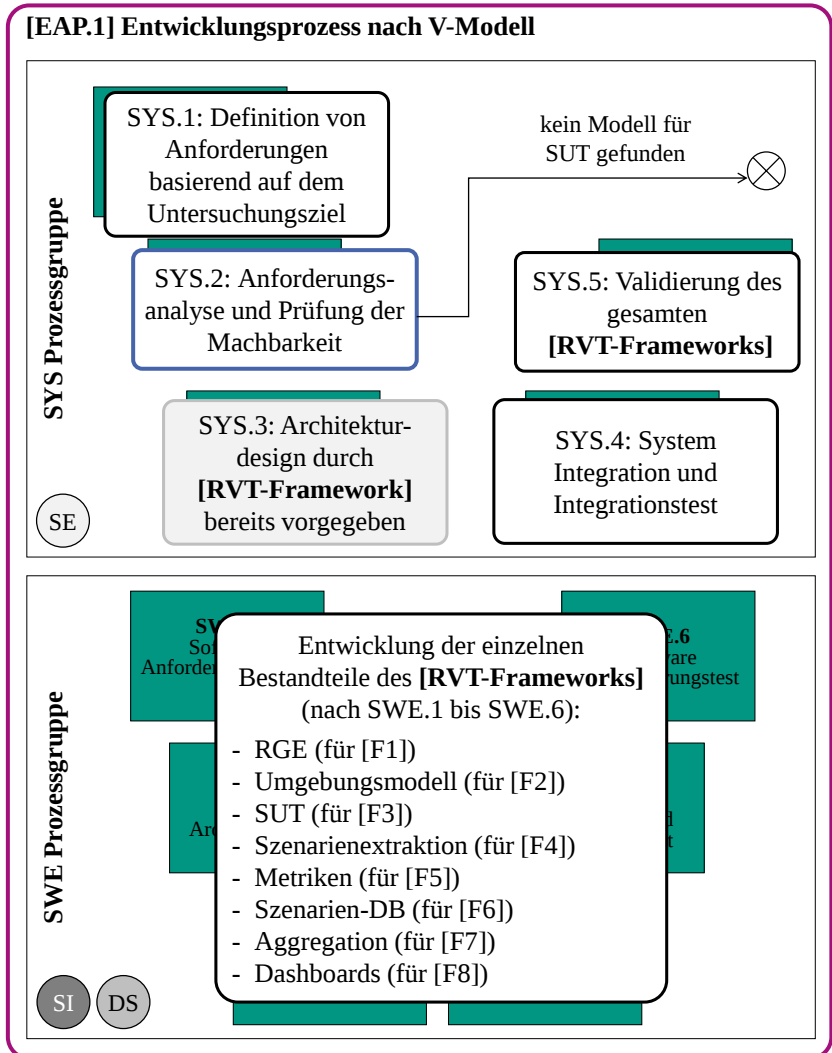


Abbildung 4.4: Entwicklungsprozess für die Simulationskette basierend auf dem Automotive-SPICE V-Modell (s. Abb. 2.7) mit den Rollen Systementwickler (SE), Simulationsingenieur (SI) sowie Data Scientist (DS). Dieser Prozess integriert sich in das Modul [EAP.1] des Entwicklungs- und Anwendungsprozesses (s. Abb. 4.3)

des Frameworks [EAP.2] definieren die Untersuchungsziele, welche Funktionsfeatures (vgl. 2.2.2) mit welchen Parametern auf welchen virtuellen Strecken analysiert werden sollen. Je nach betrachteter Fahrfunktion beinhalten die Untersuchungsziele folgende Elemente:

- mögliche Funktionsfeatures inkl. Kombinationsmöglichkeiten und Parameterbereichen sowie einer Funktionsbeschreibung
- zu untersuchende geografische Region
- zu untersuchende Nutzer-Usecases
- gewünschte Evaluierungsmetriken (ggfs. vorerst nur in Prosa)

Im nächsten Schritt (SYS.2) werden die Anforderungen analysiert und einer Machbarkeitsanalyse (s. Abb. 4.5) unterzogen. Die Machbarkeitsanalyse stellt sicher, dass für das angestrebte Untersuchungsziel eine Kombination aus einem Umgebungsmodell [F2] sowie einem MiL-Simulationsmodell des SUT [F3] gefunden werden kann, welches valide Ergebnisse erzeugt. Die Einschränkungen bei der Anwendung des RVT-Frameworks sind implizites Ergebnis dieses iterativen Modellentwicklungsprozesses. Kann die Machbarkeit nicht bestätigt werden, ist die Verwendung des Frameworks nicht möglich. Daher wird dieser Schritt direkt zu Beginn des Frameworks verortet. Dabei wird das vorgestellte Framework (s. Abb. 4.2) quasi rückwärts analysiert, indem zunächst aus den geforderten Evaluierungsmetriken [F5] Abhängigkeiten extrahiert werden, die im nächsten Schritt genutzt werden, um Anforderungen an die Simulationsmodelle des SUT [F3] und darüber hinaus an das Umgebungsmodell [F2] abzuleiten. Falls alle benötigten Attribute im Umgebungsmodell mit geforderter Qualität vorhanden sind, werden die Modelle entsprechend aufgebaut. Andernfalls müssen das Untersuchungsziel reduziert oder vereinfachende Annahmen getroffen werden, die als Einschränkungen an die erstellten Modelle gebunden werden.

Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis das Umgebungsmodell alle Anforderungen erfüllen kann. Sind die dabei definierten Einschränkungen derart,

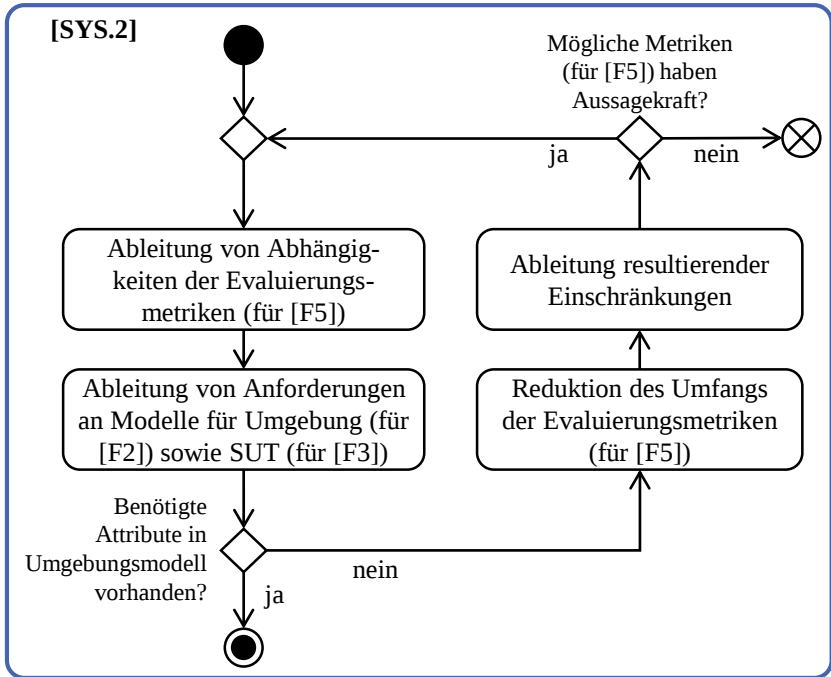


Abbildung 4.5: Iterativer Prozess zur Modellentwicklung für das SUT und die Umgebungsrepräsentation mit Prüfung der Machbarkeit sowie impliziter Analyse von eventuellen Limitierungen

dass die Metriken nicht mehr die im Untersuchungsziel definierte Aussagekraft besitzen, wird der Entwicklungsprozess [EAP.1] hier abgebrochen, da das RVT-Framework für den vorliegenden Fall nicht angewendet werden kann. Der nach Automotive-SPIICE folgende Schritt SYS.3 kann übersprungen werden, da das RVT-Framework das Architekturdesign bereits vorgibt. Daher folgen die Schritte Systemintegration/Integrationstest (SYS.4) und abschließend die Validierung des gesamten RVT-Frameworks (SYS.5). Im Rahmen der Systemintegration wird sichergestellt, dass die entwickelten Bestandteile dem Architekturdesign entsprechen. Zur Validierung des Gesamtsystems werden

exemplarische virtuelle Routen getestet und die Ergebnisse durch den SE plausibilisiert.

Auf der unteren SWE-Ebene werden die Prozessschritte SWE.1 bis SWE.6 gemäß V-Modell für die Entwicklung aller Bestandteile des RVT-Frameworks ([F1] bis [F8]) durchgeführt. Diese Aufgabe wird von den Rollen SI und DS übernommen und basiert auf den Anforderungen, die aus der SYS Prozessgruppe vom SE vorgegeben werden. Damit ist der Entwicklungsprozess [EAP.1] mit bestätigter Machbarkeit und allen entwickelten Bestandteilen (s. Abb. 4.3) abgeschlossen.

Anwendungsprozess der RVT-Simulationskette

Nachdem die RVT-Simulationskette für den vorliegenden Anwendungsfall einmalig entwickelt und validiert ist, kann sie im Rahmen des Anwendungsprozesses (s. Abb. 4.3) in die Nutzungsphase übergehen. Dazu werden im Schritt [EAP.2] konkrete Werte für die Konfigurationsparameter der Bestandteile des RVT-Frameworks festgelegt. In sogenannten „Simulations-Jobs“ wird dabei definiert, bei welcher Teststimulation (Route) [F1], welches Set aus Fahrfunktionsfeatures [F3] simuliert werden soll und welche Metriken [F5] in Kombination mit welchen extrahierten Szenarien [F4] dabei zum Einsatz kommen. Dabei wird nicht nur jeder einzelne Simulationsdurchlauf konfiguriert, sondern auch berücksichtigt, dass über alle Durchläufe die in den Untersuchungszielen geforderte Abdeckung des Streckennetzes (vgl. 5.1) und die Szenarioverteilung erfüllt werden. Darüber hinaus wird hier auch konfiguriert, welche aggregierten Auswertungen [F7] und [F8] erwartet werden.

Bei der Durchführung der Simulation [EAP.3] werden lediglich die im Schritt zuvor definierten Simulations-Jobs durch das RVT-Framework abgearbeitet und die Ergebnisse jeweils in Form von bewerteten Szenarien sowie ausgewerteten Metriken (auf Einzelfahrtebene) in der Szenario-Datenbank abgespeichert. Anhand entsprechender Meta-Attribute zum jeweiligen Simulationsdurchlauf wird der Zusammenhang zwischen den Metriken und der jeweils

zugrundeliegenden Konfiguration des Jobs hergestellt.

Nach Ausführung aller Simulations-Jobs findet im letzten Schritt die Ergebnisanalyse [EAP.4] gemäß der definierten Fragestellungen aus den Untersuchungszielen statt. Dies können beispielsweise auf Länderebene aggregierte Metriken zum Verhalten der Fahrfunktion sein oder der Vergleich von unterschiedlichen Parametrierungen.

Sofern die Ergebnisse noch Optimierungspotenzial aufweisen oder mehrere Varianten miteinander verglichen werden sollen, werden weitere Iterationen des Teilprozesses ([EAP.2] bis [EAP.4]) durchgeführt, wobei das RVT-Framework jeweils mit einer angepassten Konfiguration erneut gestartet wird.¹⁰

4.6 Diskussion der Ergebnisse

Da sich sowohl die Fahrfunktionen als auch die zu beantwortenden Fragestellungen bzw. Untersuchungsziele bei der Validierung stark unterscheiden, wird ein modulares Framework (vgl. 4.5.1) entwickelt, das je nach Anwendungsfall individuell aufgebaut werden kann. Der Vorteil des RVT-Frameworks liegt auf der Eingangsseite bei der Anregung der virtuellen Testfahrt durch Routen, die auch in der Realwelt existieren. Damit soll die Anforderung nach Repräsentativität ([Req9]) adressiert werden, die bisher für virtuelle Testfahrten nicht gegeben ist (s. Abb. 4.1). Durch die nachgelagerten Datenanalyse-Schritte auf Szenarioebene wird der datengetriebene Validierungsprozess zusätzlich unterstützt.

Somit kann die FF1 (vgl. 1.2) anhand des konzeptuellen Frameworks bereits teilweise beantwortet werden. Das Framework beinhaltet einen Prozess zur Modellerstellung für automatisierte Fahrfunktionen, der implizit auch Limitierungen herausarbeitet, die bei der Anwendung zu beachten sind (s. Abb. 4.5). Es muss ein Modell aufgebaut werden können, dessen Output die Metriken bedient und gleichzeitig mit den zur Verfügung stehenden Eingangsdaten lauf-

¹⁰ Der Optimierungsprozess wird in dieser Dissertation nicht vertiefend betrachtet. Beispiele finden sich u.a. bei Bach [5] und Themann [111].

fähig ist.

Das RVT-Framework kommt generell für die Validierung von solchen Fahrfunktionen in Frage, die geografische Einflüsse besitzen (z.B. Regions- oder Länderabhängigkeiten). Anhand des Modellerstellungsprozesses folgt dann die Prüfung, ob das Framework anwendbar ist, was vom Untersuchungsziel und der zur Verfügung stehenden Datenbasis für das benötigte Umgebungsmodell abhängt.

Für die konventionelle virtuelle Testfahrt sind die Anforderungen [Req9], [Req10] sowie [Req12] nicht erfüllt (s. Abb. 4.1). Ob diese Anforderungen für das neue RVT-Framework erfüllt sind, wird nach Betrachtung eines Anwendungsfalls beantwortet (vgl. 5.3.5 und 6.5).

5 Teststimulation anhand repräsentativer Routen

5.1 Motivation und Ziele der Teststimulation

In dieser Dissertation wird der Ansatz verfolgt, virtuelle Testfahrten zur Funktionsvalidierung zu nutzen (vgl. 4.5). Es existieren eine Reihe potenzieller Datenquellen zur Szenario-Generierung, die im Rahmen der virtuellen Testfahrten als Teststimulation genutzt werden könnten (s. Abb. 3.5). Ein Großteil der aufgestellten Anforderungen (vgl. 4.2) wird unmittelbar von der Teststimulation beeinflusst, sodass diesem Schritt innerhalb der virtuellen Testfahrten eine besondere Bedeutung zukommt.

Wegen der Realitätsnähe und Skalierbarkeit werden Kartendaten des realen Straßennetzes verwendet, um daraus ein Umgebungsmodell zu erstellen, anhand dessen die Fahrfunktion operiert (vgl. 4.5.1). Dadurch wird gewährleistet, dass die Funktion virtuell auch in den gleichen Szenarien getestet wird, wie sie in der Realwelt beim Nutzer zum Einsatz kommt. Dazu muss noch festgelegt werden, auf welchen Pfaden sich das simulierte Fahrzeug durch das in den Kartendaten repräsentierte Straßennetz (vgl. 2.5.1) bewegt.

Eine Herausforderung ergibt sich aufgrund der Graphstruktur des Straßennetzes (vgl. 2.5.3). Wird das Netz in seine elementaren Bestandteile (Kanten und Knoten) zerlegt, kann es systematisch untersucht werden, indem über diese Elemente iteriert wird. Eine virtuelle Testfahrt ist auf diesem Granularitätslevel aber nicht mehr möglich, da auch die Kreuzungen (Übergänge Kante-Knoten-Kante) von Bedeutung sind. Für vorausplanende Funktionen werden zudem Anforderungen an die Mindestlänge der betrachteten Strecken gestellt (vgl. 4.2).

Daraus resultiert die Frage, wie diese Realisationen des Streckennetzes (Abfolgen aus mehreren Kanten und Knoten) gewählt werden, um das Verhalten der Fahrfunktion in der virtuellen Testfahrt entsprechend des jeweiligen Untersuchungsziels (vgl. 3.1) abzubilden. In diesem Kapitel werden unterschiedliche Verfahren zur Routengenerierung (RGE) miteinander verglichen, die potenziell in Schritt [F1] des RVT-Frameworks (s. Abb. 4.2) zum Einsatz kommen können. Da es aber von dem jeweiligen Anwendungsfall abhängt, welche Ziele die simulative Untersuchung und somit auch die Routen erfüllen sollen, wird in diesem Kapitel über den reinen Vergleich hinaus kein Verfahren priorisiert. Basierend auf den Anforderungen an die Validierung des SUT (vgl. 4.2) ergeben sich folgende Ziele als Randbedingung bei der Erstellung der Routen:

- hohe Abdeckung des Streckennetzes
- geringe Länge der zu simulierenden Strecke
- geringe Überlappung mehrerer Testrouten
- hohe Repräsentativität der Szenarienverteilung

Sollen alle vier Ziele gleichzeitig berücksichtigt werden, ergeben sich Zielkonflikte. Eine hohe Abdeckung des Streckennetzes durch virtuelle Routen steht im Widerspruch zu einer geringen Länge der zu simulierenden Strecke und auch zum Ziel, dass eine geringe Überlappung der Testrouten angestrebt wird. Wird die Repräsentativität der Szenarienverteilung berücksichtigt, müssen Streckenabschnitte, die in der Realität häufiger befahren werden, auch in der Simulation entsprechend häufiger vertreten sein. Dieses Ziel lässt sich nicht gleichzeitig mit der hohen Abdeckung des Streckennetzes und der geforderten, geringen Streckenlänge vereinbaren. Verfahren zur RGE (vgl. 2.7) werden daher je nach Anwendungsfall hinsichtlich des besten Kompromisses bezüglich des beschriebenen Zielkonflikts bewertet und ausgewählt.

5.2 Methode zur Bewertung von Routen anhand einer Referenz

Um für den jeweiligen Anwendungsfall (je nach SUT und Untersuchungsziel) die passende Methode zur Generierung der Routen zu finden, wird eine Methode zur Bewertung der Eignung der Routen hinsichtlich der definierten Ziele (vgl. 5.1) benötigt. Während die ersten drei Ziele (Abdeckung, Umfang, Überlappung) vergleichsweise einfach objektiv bewertet werden können (vgl. 5.3.4), erfordert die Untersuchung der Repräsentativität der Szenarierverteilung (vgl. 3.1) eine tiefgehende methodische Betrachtung.

5.2.1 Theoretische Überlegungen zur statistischen Validierung des SUT

Ziel der Validierung des SUT ist herauszufinden, ob die Erwartungen des Nutzers an das SUT erfüllt werden (vgl. 3.1). Aus statistischer Sicht wäre eine Erhebung, z.B. in Form einer Befragung der Nutzer (Merkmalsträger), denkbar. Die Menge aller Nutzer der Fahrfunktion bildet die Grundgesamtheit, aus der vereinfachend ausgewählte Elemente in Form einer Stichprobe selektiert werden könnten, falls eine Vollerhebung zu aufwändig wäre. Anhand der Stichprobe würde auf das Untersuchungsmerkmal (Bewertung der Fahrfunktion) geschlossen.

Aufgrund der beschriebenen Randbedingungen (vgl. 3.1) kann eine direkte Befragung der Nutzer nicht in Betracht gezogen werden, solange sich das SUT noch in der Entwicklung befindet. Daraus leitet sich die Frage ab, ob die statistischen Grundlagen auch auf die virtuelle Testfahrt übertragbar sind. Der Vorteil der virtuellen Testfahrt ist, dass alle simulierten Instanzen des SUT für eine „Befragung“ zugänglich sind.

Die Bewertung des SUT hängt aber maßgeblich von den gewählten, virtuellen Routen ab (vgl. 5.1). Dadurch verlagert sich das statistische Problem auf

die Teststimulation und somit die RGE¹. Die Grundgesamtheit der potenziellen Routen ist allerdings unbekannt, sofern sie nicht durch Informationen, wie z.B. aus der Kundenfahrzeugflotte (vgl. 2.7.1), zumindest näherungsweise geschätzt werden kann.

Daher kommen die Verfahren zur künstlichen Generierung von Routen zum Einsatz (vgl. 2.7). Um die Repräsentativität (vgl. 3.1) dieser Routen bewerten zu können, existieren aktuell keine Methoden. Daher wird im Folgenden eine neue Methode vorgestellt, die auf Basis von FCD als Referenzdatenquelle darauf abzielt, die Repräsentativität quantitativ analysierbar zu machen.

5.2.2 Floating Car Data als Referenz

FCD sind Geopositionsdaten, die Informationen darüber enthalten, wie der Schwarm der Verkehrsteilnehmer das Streckennetz nutzt (vgl. 2.8). Daraus folgt der Ansatz, dass FCD in aufbereiteter Form als Referenz verwendet werden können, um Verfahren zur RGE hinsichtlich ihrer Repräsentativität zu bewerten. Die Grundidee dabei ist, dass Kanten des Streckennetzes, die während der RGE häufig auftreten, auch laut FCD häufiger in der Realität befahren werden. Es wird also nicht direkt geprüft, ob die generierten Routen in der Realität existieren, sondern, ob die sich aus den Routen ergebende Häufigkeitsverteilung der befahrenen Kanten gleich ist.

Um beurteilen zu können, ob sich eine gegebene Datenquelle von FCD als Referenz eignet, ist der Entstehungsprozess der FCD entscheidend. Die Schritte (1 bis 4) werden durchlaufen bis die FCD pro Kante und Zeiteinheit vorliegen (s. Abb. 5.1). Die nachfolgenden Verarbeitungsschritte (5 bis 8) dienen dazu, die generierten Routen mit den FCD vergleichen zu können.

Zur Verwendung der FCD werden eine Reihe von Annahmen, bzw. notwendige Voraussetzungen definiert:

¹ Dies folgt aus der Annahme, dass die Teststimulation lediglich durch die zugrunde liegende Route und die sich darauf befindlichen Szenarien definiert ist.

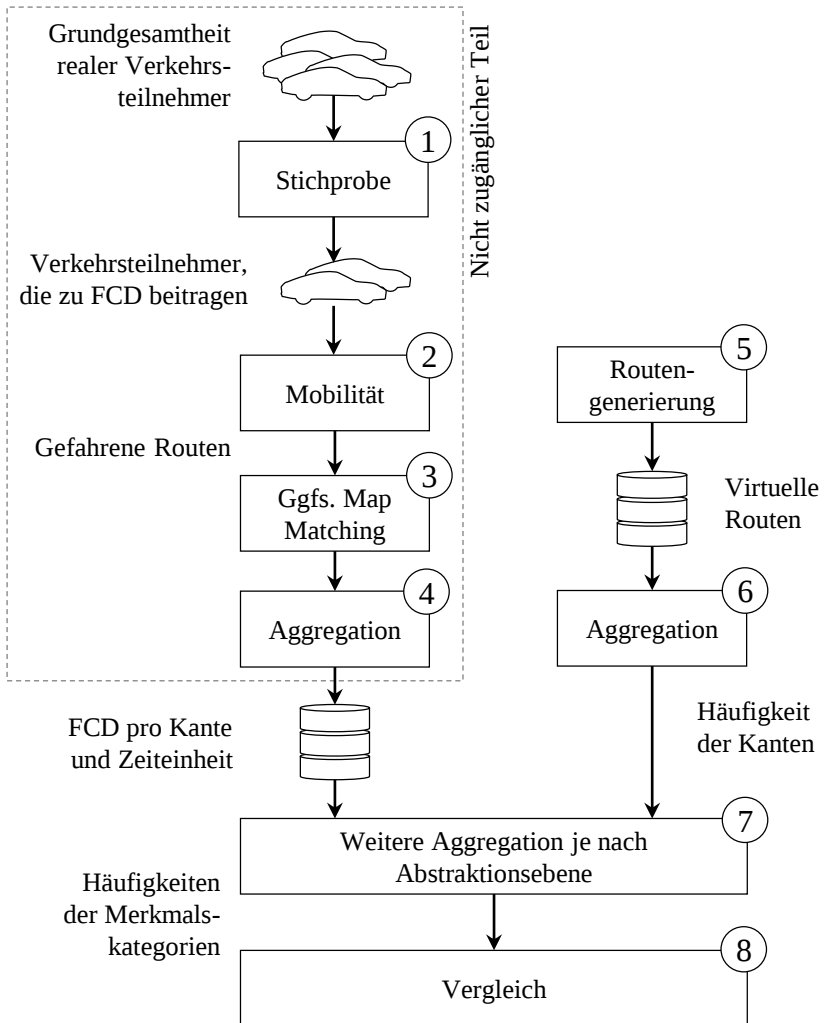


Abbildung 5.1: Verarbeitungsschritte der Floating Car Data (FCD) als Referenz zur Routenbewertung. Die Schritte 1 bis 4 beschreiben den Erstellungsprozess der FCD, bevor diese zur Verfügung stehen. Die generierten, virtuellen Routen werden aggregiert, damit ein Vergleich mit den FCD stattfinden kann.

- Die Verkehrsteilnehmer, die zu den FCD beigetragen haben, besitzen ein vergleichbares Mobilitätsverhalten wie die zukünftigen Benutzer des SUT. Kommt das SUT beispielsweise nur in PKW zum Einsatz, sollten die FCD auch nur von PKW generiert werden. Dies muss in Schritt 1 berücksichtigt werden (s. Abb. 5.1).
- Bei der Erhebung der FCD werden alle Mobilitäten gleichermaßen erfasst.² Dies wird durch Schritt 2 symbolisiert, dessen Output die gefahrenen Routen sind.
- Die FCD enthalten Informationen darüber, wie viele Verkehrsteilnehmer pro Zeiteinheit einen bestimmten Teil des Streckennetzes befahren haben. Während der Aggregation in Schritt 4 gilt es, die Information pro Kante und definierter Zeiteinheit zu aggregieren. Dabei darf jeder Verkehrsteilnehmer pro Trip nur einmal für jede Kante gezählt werden, auch wenn ggfs. mehrere Messwerte³ pro Kante vorliegen.
- Nicht alle Verkehrsteilnehmer tragen zur Erstellung der FCD bei (siehe Stichprobe in Schritt 1). Der benötigte Umfang der generierten FCD pro Kante hängt vom jeweiligen Untersuchungsziel ab.
- Die FCD enthalten keine Information über die Abfolge von gefahrenen Kanten, sodass eine direkte Ableitung von realistischen Routen nicht möglich ist.

Datenquellen, die diese Voraussetzungen erfüllen, eignen sich grundsätzlich als Referenz für die Bewertungsmethode. Der Aggregationsschritt 4 kann im Allgemeinen nicht rückgängig gemacht werden, da der Informationsgehalt während der Aggregation reduziert wird. Daher werden alle in Schritt 5 generierten, virtuellen Routen ebenfalls auf Ebene von Kanten aggregiert (Schritt 6), sodass daraus eine Häufigkeitsverteilung für alle Kanten resultiert.

² Systematische Fehler könnten auftreten, falls beispielsweise nur lange, überregionale Trips in die FCD einfließen, nicht aber kurze Trips, wie zum nahegelegenen Supermarkt.

³ Engl. probes

Um beide Häufigkeitsverteilungen miteinander zu vergleichen (Schritt 8), sind unterschiedliche Abstraktionsebenen möglich, die sich auf die Anzahl der Merkmalskategorien auswirken. Die niedrigste Abstraktionsebene wäre, jede einzelne Kante als eine Merkmalskategorie zu definieren. Um die Anzahl der Kategorien zu reduzieren, sind in Schritt 7 weitere Aggregationen möglich (vgl. 5.2.4).

5.2.3 Abgleich der Häufigkeitsverteilung generierter Routen mit FCD anhand des Chi-Quadrat-Homogenitätstests

Für den Vergleich beider Häufigkeitsverteilungen X_{GT} und X_{VR} in Schritt 8 (s. Abb. 5.1) mit den absoluten Häufigkeiten $(H_{GT,j})_{j=1}^k$ der FCD⁴ und $(H_{VR,j})_{j=1}^k$ der virtuellen Routen (VR) sowie den zugehörigen relativen Häufigkeiten $h_{GT,j} = H_{GT,j} / \sum_{i=1}^k H_{GT,i}$ und $h_{VR,j} = H_{VR,j} / \sum_{i=1}^k H_{VR,i}$ für die k Merkmalskategorien sind unterschiedliche Abweichungsmaße denkbar [51], wie z.B. die mittlere quadratische Abweichung⁵

$$MSE = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k (h_{GT,j} - h_{VR,j})^2 \quad (5.1)$$

oder die mit der Kantenlänge w_j gewichtete absolute Abweichung⁶

$$MWAE = \sum_{j=1}^k w_j |h_{GT,j} - h_{VR,j}| \quad , \text{ mit } w_j = l_j / \sum_{i=1}^k l_i. \quad (5.2)$$

Diese Abweichungsmaße eignen sich für relative Fragestellungen. Sollen zwei Verfahren zur RGE miteinander verglichen werden, bieten die Maße einen Anhaltswert. Bei der absoluten Einschätzung eines einzelnen Verfahrens tritt jedoch gerade bei einer großen Anzahl von Kategorien die Herausforderung auf, eine bestehende Abweichung zu beurteilen.

⁴ hier als Ground Truth (GT) bezeichnet

⁵ Engl. mean squared error

⁶ Engl. mean weighted absolute error

Die Frage, ob sich die beiden zu vergleichenden Stichproben ähneln, lässt sich auf die Frage zurückführen, wie wahrscheinlich es ist, dass beide Verteilungen aus einer gemeinsamen Grundgesamtheit stammen. Dazu liefert der Chi-Quadrat-Homogenitätstest einen statistischen Nachweis in Form einer Hypothesentests. Wegen der k Merkmalskategorien liegen nominalskalierte Daten vor, auf die der Test anwendbar ist [126].

Die Nullhypothese H_0 besagt, dass beide Verteilungen aus derselben Grundgesamtheit stammen, während die Gegenhypothese H_1 von zwei unterschiedlichen Verteilungen ausgeht⁷[126].

Die Teststatistik berechnet sich als Summe der Abweichungsquadrate zwischen der tatsächlichen und der erwarteten Verteilung zu

$$\chi_{emp}^2 = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m \frac{(n_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}}, \quad (5.3)$$

mit den erwarteten Zellhäufigkeiten

$$E_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k n_{ij} \sum_{i=1}^m n_{ij}, \quad (5.4)$$

wobei k die Anzahl der Merkmalskategorien und $m = 2$ die beiden Stichproben (GT und VR) bezeichnet. Die absolute Anzahl der Ergebnisse pro Merkmalskategorie j und Stichprobe i wird durch n_{ij} beschrieben und es gilt $n = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m n_{ij}$ [126].

Sind die Abweichungen zwischen beiden Stichprobenverteilungen signifikant, sodass für die Prüfgröße

$$\chi_{emp}^2 > \chi_{f;1-\alpha}^2, \quad (5.5)$$

gilt, wird die Nullhypothese H_0 verworfen. Als Testverteilung dient die χ^2 -Verteilung mit den Parametern Freiheitsgrad $f = (k - 1)(m - 1)$ sowie Signifikanzniveau α . Im vorliegenden Fall von $m = 2$ ergibt sich für den Freiheitsgrad

⁷ Allgemein lässt sich der Chi-Quadrat-Homogenitätstest auf $m \geq 2$ Stichproben anwenden. In unserem Beispiel gilt $m = 2$.

somit $f = k - 1$, da nur die Werte von $k - 1$ Kategorien vom Zufall abhängen, während der Wert der letzten Kategorie über die Randbedingung, dass die Gesamtzahl $n_i = \sum_{j=1}^k$ bekannt ist, implizit definiert ist [126].

Definition 5.1 (Signifikanzniveau). Das Signifikanzniveau α ist die zulässige Irrtumswahrscheinlichkeit, mit der es beim Signifikanztest zu einer Fehlentscheidung kommen darf. [8]

Definition 5.2 (Signifikanztest). Der Signifikanztest prüft gegebene Hypothesen über die Verteilung einer Grundgesamtheit anhand der Ergebnisse einer vorliegenden Stichprobe. Gibt es deutliche (= signifikante) Gegensätze zwischen der Hypothese und dem Stichprobenergebnis, wird die Hypothese verworfen. [8]

Die χ^2 -Verteilung bildet sich als Summe quadrierter normierter Normalverteilungen, sodass sie nur positive Werte annimmt, wobei der Freiheitsgrad die Zahl der Summanden festlegt. Sind die Abweichungen nicht signifikant, kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Abweichungen nicht durch den Zufall bedingt sind, sodass H_0 in dem Fall nicht widerlegt wird, was genau genommen aber kein Beweis für das Vorliegen von H_0 ist. Voraussetzung für die Anwendung des approximativen Chi-Quadrat-Homogenitätstests ist, dass für die erwarteten Zellhäufigkeiten $E_{ij} \geq 5 \quad \forall \quad i, j$ gilt [89].

5.2.4 Definition der Merkmalskategorien

Für die Erzeugung von Merkmalskategorien für Schritt 7 (s. Abb. 5.1) sind unterschiedliche Abstraktionsebenen möglich. Die unterste Abstraktionsebene wird durch die Formate der Eingangsinformationen vorgegeben. Neben der Aggregation auf der Ebene von Kanten können die Merkmalskategorien anhand von beliebigen Attributen, die auf Kantenebene z.B. aus den Kartendaten extrahiert werden können, kategorisiert werden.

Als Beispiel dafür bietet sich die (Straßenkategorie) SK an, die Kanten hinsichtlich ihrer Funktion im Streckennetz einstuft (vgl. 2.5.2). Während die Stra-

Benkategorie bereits Informationen über die zu erwartende Geschwindigkeit enthält, wäre es alternativ auch denkbar, das gesetzliche Tempolimit zur Einstufung heranzuziehen. Auf höherer Abstraktionsebene sind geografische Aggregationen innerhalb von Gitterzellen mit konfigurierbaren Abmaßen oder auf Basis von administrativen Grenzen (Kreis, Bundesland, Land) möglich.

Die Wahl der richtigen Kategorisierung hängt vom Anwendungsfall ab. Eine repräsentative RGE ist überhaupt nur relevant, wenn die Performance des SUT auch Abhängigkeiten von der Route selbst besitzt. Daher wäre ein weiterer Ansatz, die Kategorisierung explizit anhand der das SUT beeinflussenden Faktoren vorzunehmen. Dies kann entweder anhand von Expertenwissen erfolgen, wie es bei den zuvor erwähnten Kategorien gehandhabt wird, oder durch gezielte Korrelationsanalysen im Falle, dass bereits bewertete, streckenbezogene Daten zum SUT verfügbar sind.

5.3 Implementierung und Vergleich von Verfahren zur Routengenerierung (RGE)

Welches der Verfahren zur RGE (vgl. 2.7) herangezogen wird, hängt vom Anwendungsfall sowie der Verfügbarkeit von Datensätzen, die für manche Verfahren benötigt werden, ab. Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Ausarbeitung stehen zwar aufgezeichnete Routen von Erprobungsfahrten (vgl. 2.7.1) zur Verfügung, allerdings liegt ein Großteil dieser Routen in direkter Umgebung des Entwicklungsstandortes und abseits davon existieren nur Daten einzelner Fahrten mit stichprobenartigem Charakter. Daher kommt dieser Ansatz für eine Analyse nicht in Frage. Ebenso werden die Verfahren zur sequentiellen Kantenwahl (vgl. 2.7.2) ausgeschlossen, da eine realistische Abfolge von Kanten nicht gegeben ist. Somit liegt der Fokus auf der Implementierung und Evaluierung der beiden Verfahren mit globaler Routenberechnung (vgl. 2.7.3), für die nun die Schritte 5 bis 8 (s. Abb. 5.1) durchgeführt werden.

5.3.1 Globale Routenberechnung mit stochastischer Wahl von Start- und Zielpunkt

Bei der globalen Routenberechnung werden zwei Parameter benötigt: die Geopositionen des Startpunktes sowie die des Zielpunktes. Um eine realistische Verteilung dieser Geopositionen zu erhalten, wird eine Karte der Bevölkerungszahlen als Datengrundlage herangezogen, um die Start- und Zielpunkte zu generieren (vgl. 2.7.3). Dadurch wird der Annahme, dass die Start- und Zielpunkte von Routen in dichter besiedelten Regionen eine höhere Wahrscheinlichkeit besitzen, Rechnung getragen. Der Datensatz zur Bevölkerungszahl ist in Gitterzellen mit einer Seitenlänge von 30 Bogensekunden⁸ eingeteilt [21]. Die Bevölkerungszahl wird als empirische Wahrscheinlichkeitsverteilung $p(\varphi, \lambda | \Psi)$ mit den geografischen Koordinaten der Gitterzellenzentren φ, λ sowie der Bevölkerungszahl Ψ aufgefasst. Diese Methode erlaubt, dass von einer allgemeinen Bevölkerungsverteilung abgewichen wird und eine anwendungsfallspezifische Verteilung zugrunde gelegt wird. Ein OEM könnte beispielsweise die geografische Verteilung seiner Kunden heranziehen, sofern bekannt, um für seine Kunden repräsentative Aussagen hinsichtlich der generierten Routen zu erzielen.

Für die RGE wird der in Abb. 5.2 eingerahmte Bereich von $\varphi = [46, 55]^\circ \text{ N}$ und $\lambda = [2, 12]^\circ \text{ O}$ verwendet, der die Niederlande, Belgien, Luxemburg sowie Teile von Deutschland, Österreich, Schweiz, Italien, Frankreich und Dänemark enthält und als Untersuchungsgebiet bezeichnet werde. Zentral im Untersuchungsgebiet liegt das für die Auswertung relevante Evaluierungsgebiet mit $\varphi \in [50, 03; 50, 93]^\circ \text{ N}$ und $\lambda \in [6, 47; 7, 87]^\circ \text{ O}$. Die Randgebiete werden gezielt von der Betrachtung ausgeschlossen, da andernfalls das Risiko besteht, dass längere Routen unterrepräsentiert sind, die eigentlich über die Grenze des Untersuchungsgebiets hinaus verlaufen würden (weitere Details vgl. 5.3.3). In

⁸ Dies entspricht am Äquator einer Länge von ca. 930 m. Mit zunehmender geografischer Breite (also in Richtung der Pole) nimmt die Ausdehnung im Längengrad aufgrund des kleineren Abstands zwischen zwei Meridianen ab. Dadurch werden die Gitterzellen außerhalb des Äquators entsprechend kleiner. Der Datensatz stammt aus dem Jahr 2020.

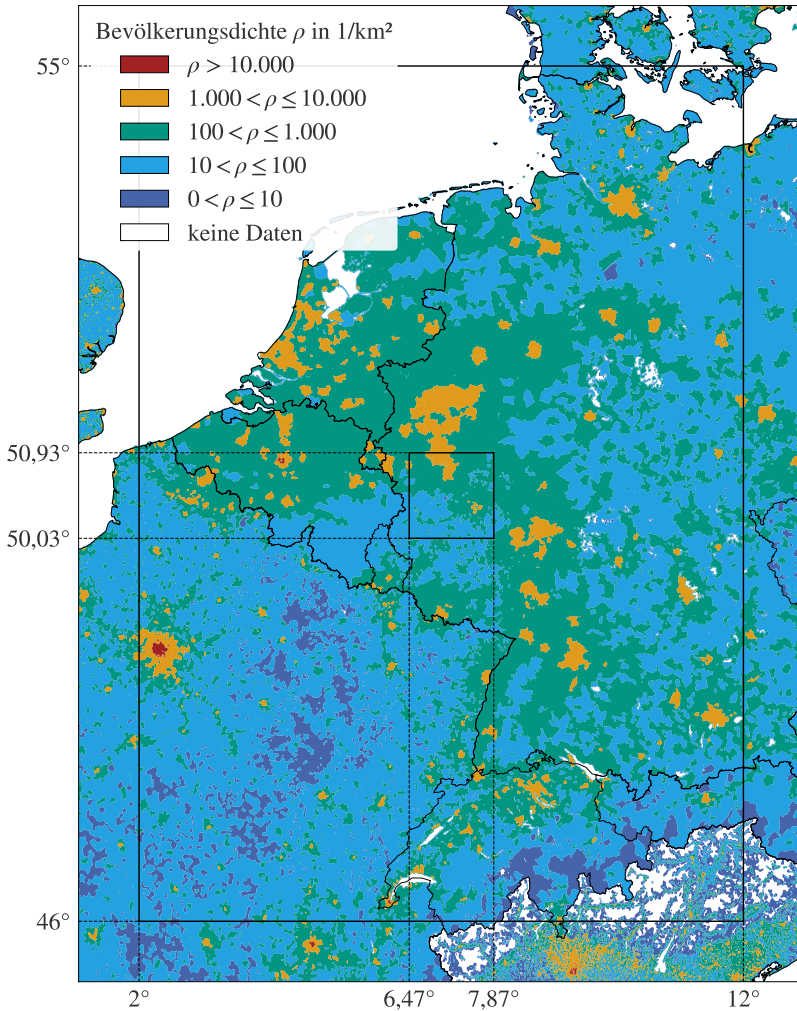


Abbildung 5.2: Darstellung der verwendeten Bevölkerungszahlen Ψ in Form der Bevölkerungsdichte ρ innerhalb der definierten geografischen Grenzen. Das äußere Rechteck umfasst das Untersuchungsgebiet. Das innere Rechteck umfasst das Evaluierungsgebiet.

der Abbildung 5.2 ist die Bevölkerungsdichte dargestellt, die sich durch Normung der Bevölkerungszahl auf die jeweilige Landfläche⁹ pro Gitterzelle ergibt. Das Vorgehen zur stochastischen Bestimmung von Routen wird in Form

Algorithmus 1 Stochastische Routenberechnung mit Breitengrad φ , Längengrad λ , Bevölkerungszahl ψ , Radius r , Punkt P , Konfigurationsfaktor f sowie Routenlänge l

```

1:  $i = 0$ 
2: while  $i \neq n_s$  do
3:   ziehe ein Koordinatenpaar  $P_1 = (\varphi_1, \lambda_1)$  aus  $p(\varphi, \lambda | \Psi)$ 
4:   ziehe eine Sollroutenlänge  $l_{soll}$  aus  $p(l)$ 
5:   schätze die Luftliniendistanz  $l_{Luft} = l_{soll} / f_{Luft}$ 
6:   berechne Kreisring um  $P_1$  mit  $r_i = l_{Luft}(1 - f_{tol})$ ,  $r_a = l_{Luft}(1 + f_{tol})$ 
7:   setze  $\Psi_{red}(\varphi_2, \lambda_2) := 0 \ \forall \ (\varphi_2, \lambda_2)$  außerhalb des Kreisringes
8:   ziehe ein Koordinatenpaar  $P_2 = (\varphi_2, \lambda_2)$  aus  $p(\varphi, \lambda | \Psi_{red})$ 
9:   berechne Route zwischen  $P_1$  und  $P_2$ 
10:   $i := i + 1$ 
11: end while
12: result: Liste mit  $n_s$  Routen

```

eines Algorithmus definiert (vgl. Algorithmus 1). Aus der gegebenen Verteilung $p(\varphi, \lambda | \Psi)$ (Abb. 5.2) wird zunächst ein Koordinatenpaar $P_1 = (\varphi_1, \lambda_1)$ gezogen (Algo. 1, Zeile 3), welches als Startpunkt der generierten Route dient. Zur Festlegung der Routenlänge wird aus einer Verteilung $p(l)$ der Sollroutenlänge l_{soll} (Algo. 1, Zeile 4) gezogen.

Die Verteilung $p(l)$ für die Routenlänge wird auf Basis der Ergebnisse einer Umfrage zur Mobilität in Deutschland aus dem Jahr 2017 erstellt. Der Ergebnisbericht der Umfrage enthält eine Häufigkeitsverteilung der Routenlängen zwischen 0 und 100 km, die mit einem PKW im Alltagsverkehr zurückgelegt werden. Die Trips mit einer Länge bis 100 km machen bereits etwa 98,3% aller Trips aus (siehe Verteilungsfunktion in Abb. 5.3) [72].

Für den Anwendungsfall der RGE sind dennoch auch längere Routen relevant, da diese kumuliert etwa 26,5% der Gesamtstrecke ausmachen (vgl. Abb. 5.3).

⁹ Größere Wasserflächen werden dort gezielt abgezogen.

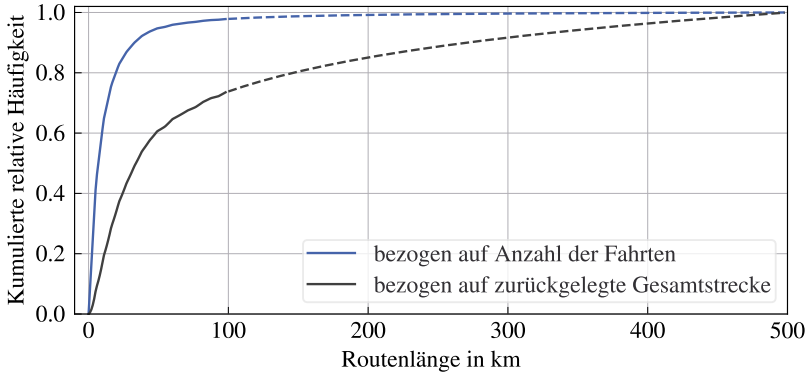


Abbildung 5.3: Kumulierte relative Häufigkeiten der Routenlängen bezogen auf die Anzahl an Fahrten sowie auf die zurückgelegte Gesamtstrecke (bis 100 km basierend auf [72])

Daher wird die gegebene Verteilung mit einem $1/x^2$ -Ansatz extrapoliert mit der Randbedingung, dass sowohl die Summe der Trips als auch die Summe der Gesamtstrecke der Trips jeweils 100% ergibt.

Mit dem Ziel, dass die erzeugten Routen der vorgegebenen Routenlängenverteilung $p(l)$ genügen, ist es nicht zielführend, die gezogene Sollroutenlänge l_{soll} als Luftliniendistanz zwischen Start- und Zielpunkt zu verwenden, denn in den allermeisten Fällen ist die tatsächliche Route aufgrund der Gegebenheiten des Straßennetzes länger als die Luftliniendistanz¹⁰. Zusätzlich kann die zeitlich kürzeste Route länger sein als die kürzeste Route in Bezug auf die Strecke. Daher wird anhand eines empirisch gefundenen Faktors f_{Luft} (vgl. A.1) die Sollroutenlänge in eine geschätzte Luftliniendistanz l_{Luft} umgerechnet (Algo. 1, Zeile 5).

Auch der Zielpunkt der Route soll stochastisch bestimmt werden. Dazu wird ein Kreisring mit den Radien r_i und r_a definiert, der als Maske auf die Ver-

¹⁰ Es besteht die theoretische Ausnahme, dass es eine Route gibt, die Start- und Zielpunkt mit einer Geraden verbindet.

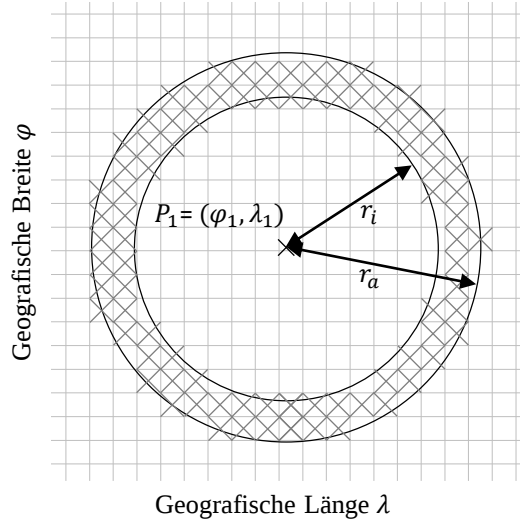


Abbildung 5.4: Schematische Darstellung der auf einen Kreisring reduzierten Grundgesamtheit für das Ziehen des Zielpunktes $P_2 = (\varphi_2, \lambda_2)$ basierend auf einem Startpunkt $P_1 = (\varphi_1, \lambda_1)$ und dem inneren und äußeren Radius r_i und r_a . Die Zentren der mit einem Kreuz markierten Gitterzellen fallen innerhalb des Kreisringes.

teilung der Bevölkerungszahl gelegt wird (Algo. 1, Zeilen 7, 8 und Abb. 5.4). Über den Toleranzfaktor $f_{tol} > 0$ wird beeinflusst, welche Gitterzellen für das Ziehen des Zielpunktes zugelassen werden¹¹. Aus der reduzierten Bevölkerungsverteilung $p(\varphi, \lambda | \Psi_{red})$ wird anschließend der Zielpunkt $P_2 = (\varphi_2, \lambda_2)$ gezogen (Algo. 1, Zeile 8).

Abgrenzend zu anderen Verfahren für die RGE wird das stochastische Verfahren mit STO abgekürzt. Da sowohl Start- und Zielpunkt als auch die Routen-

¹¹ Die Wahl von f_{tol} hängt von der räumlichen Auflösung der verwendeten Bevölkerungsverteilung ab. Wird f_{tol} zu klein gewählt, fallen kaum Gitterzellen in den resultierenden Kreisring, sodass der stochastische Charakter im Folgeschritt eingeschränkt wird. Auf der anderen Seite ergeben sich potenziell größere Abweichungen von der Sollluftliniendistanz l_{Luft} , je größer f_{tol} gewählt wird. Daher wird in der vorliegenden Untersuchung eine Toleranz von $f_{tol} = 0,02$ gewählt, die in der Größenordnung der Unsicherheit von f_{Luft} liegt.

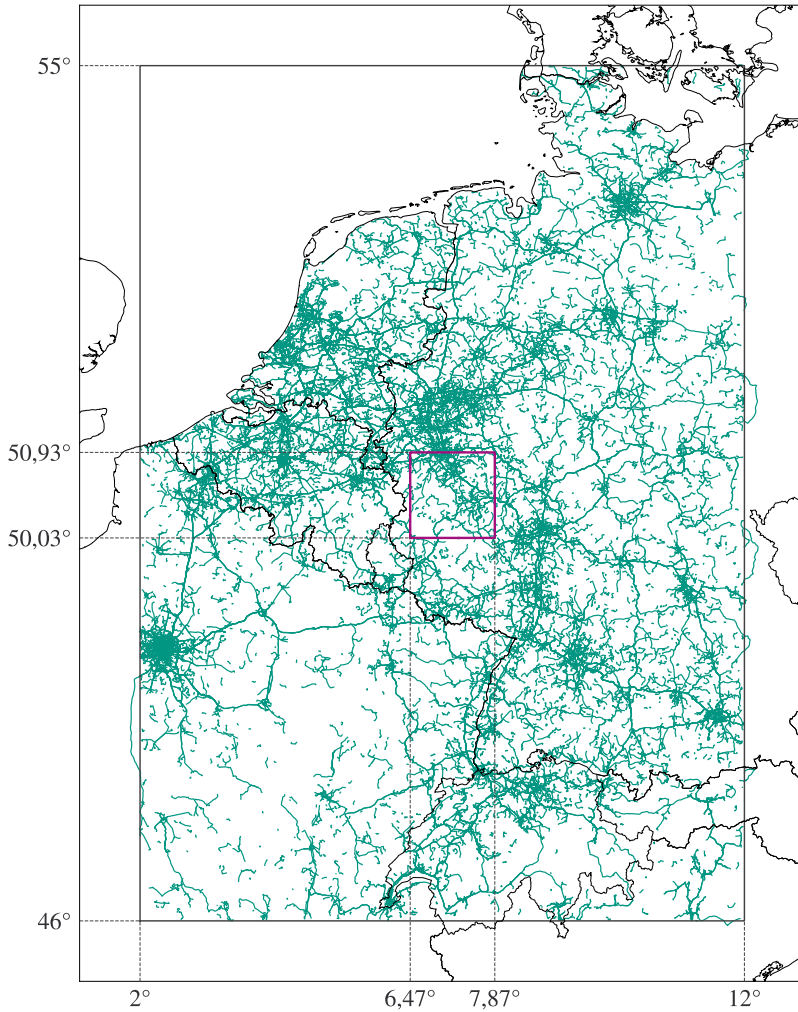


Abbildung 5.5: Mit stochastischem Ansatz (STO) innerhalb des Untersuchungsgebiets generierte, virtuelle Routen mit einem Stichprobenumfang von $n_s = 10.000$

länge aus empirischen Verteilungen als zufällige Stichprobe gezogen werden, wird davon ausgegangen, dass die auf diese Art erzeugten Routen einen hohen Grad an Repräsentativität für alltägliche Mobilitätsmuster besitzen. Vereinfachend wird dabei angenommen, dass es keine signifikanten Unterschiede der Mobilitätsmuster verschiedener Fahrzeugmarken und -typen gibt, da die vorliegende Datenbasis keine differenzierte Aufschlüsselung erlaubt. Zudem liegt dem Vorgehen die vereinfachende Annahme zugrunde, dass die Wahrscheinlichkeit für die Routenlängen unabhängig vom Routenstartpunkt ist, also $p(l|\varphi, \lambda) = p(l)$ gilt. Bei Vorliegen entsprechender Schwarmdaten, die eine differenziertere Aussage zu der Routenlänge erlauben, wäre es denkbar, diese stattdessen für das Ziehen der Routenlänge zu verwenden.

Bei der Erstellung von $n_S = 10.000$ Routen nach Algorithmus 1 lässt sich durch lokale Häufungen von Routen (s. Abb. 5.5) eine Ähnlichkeit zur verwendeten Bevölkerungsdichte (s. Abb. 5.2) feststellen. Als Beispiel sei die Metropolregion Paris erwähnt, die am linken Rand in der unten Hälfte erkennbar ist. Ein vollständiger quantitativer Abgleich folgt (vgl. 5.3.4). Es sei außerdem darauf hingewiesen, dass Routen mit einer Länge $l_{soll} < 10$ km bereits einen Anteil von 64% aller Routen repräsentieren (s. Abb. 5.3), was die hohe Häufigkeit sehr kurzer generierter Routen erklärt.

5.3.2 Systematische Routengenerierung mit der Destinationskreis-Methode

Um die STO zu bewerten, wird zusätzlich die DKM (vgl. 2.7.3) als Referenz implementiert. Die Eigenschaften der generierten Routen werden durch die Wahl der Parameter der Methode beeinflusst. Daher werden fünf Varianten (DKM1...DKM5) definiert, um den Parameterraum exemplarisch abzudecken¹² (vgl. Tabelle A.1).

Der Radius r_d wird variiert, da erwartet wird, dass die resultierende Routenlän-

¹² Für eine Untersuchung der Einflüsse und Wechselwirkungen der Parameter untereinander wird auf [133] verwiesen.

ge mit der Verteilung der (Straßenkategorie) SK entlang der Route korreliert. Die Parameter Überlappung v sowie Winkelauflösung α wirken sich auf die erzielte Abdeckung des Streckennetzes aus [133] und werden daher ebenfalls untersucht.

Für das Parameterset der Variante DKM2 werden die Routen exemplarisch ermittelt und im Anhang visualisiert (s. Abb. A.3). Bedingt durch den deterministischen Charakter dieser Methode ergibt sich im Kontrast zur STO eine sehr gleichmäßige Abdeckung des Untersuchungsgebiets. Lediglich in bergigen Regionen in der Schweiz, in Österreich und Italien sowie in Regionen an den Küsten mit größeren Wasserflächen können teilweise keine Routen ermittelt werden, da entweder der Start- oder Zielpunkt mit dem PKW nicht erreichbar ist. Auch für die Auswertung der mit der DKM generierten Routen wird das bereits definierte Evaluierungsgebiet herangezogen (vgl. 5.3.1).

5.3.3 Abgleich der Routen mit Floating Car Data (FCD)

Die generierten Routen sollen anhand einer aus FCD generierten Referenz auf dem Evaluierungsgebiet bewertet werden (vgl. 5.2.2). Die relevanten Eckdaten zur Erzeugung der verwendeten FCD sind in Tabelle 5.2 aufgelistet. Da die Daten aus einem zusammenhängenden Zeitraum von zwei Wochen gewählt wurden, kann angenommen werden, dass ein gleichmäßiges Verhältnis von Wochentagen zu Wochenendtagen gewährleistet ist.

Das annähernd quadratische Evaluierungsgebiet misst eine Seitenlänge von 100 km¹³ und umfasst 43.590 km Streckennetz¹⁴. Eine Betrachtung des Streckennetzes nach SK gruppiert zeigt, dass Kanten mit SK1 lediglich 2,6% des gesamten Streckennetzes bilden, dort aber mit $24,08 \cdot 10^6$ km etwa 72% der FCD-Strecke zurückgelegt werden (s. Tab. 5.1).

¹³ Leichte Abweichungen davon sind durch die Krümmung der Längengrade zu erwarten (vgl. 5.3.1).

¹⁴ Kartendatenstand: Q1 2021. In dieser Auswertung werden bei Straßen, die baulich voneinander getrennte Richtungsfahrbahnen (vgl. 2.5.1) aufweisen, die Fahrbahnen separat (also näherungsweise doppelt) gezählt.

Tabelle 5.1: Eigenschaften des Streckennetzes sowie der FCD innerhalb des Evaluierungsgebiets untergliedert nach SK (vgl. Tab. 2.1). Der Anteil der SK beschreibt den streckenbezogenen Anteil, den eine SK vom Gesamtstreckennetz einnimmt. Die prozentuale Abdeckung mit FCD beschreibt, auf welchem Anteil der Streckennetzlänge mindestens eine FCD-Information von einem Fahrzeug vorhanden ist. Die FCD-Strecke ist definiert durch die Summe der Strecken, die durch die FCD-Fahrzeuge zurückgelegt werden.

Kriterium	SK1	SK2	SK3	SK4	SK5
Streckennetzlänge in km	1.119	2.062	4.449	3.616	32.344
Streckenanteil pro SK in %	2,6	4,7	10,2	8,3	74,2
FCD-Abdeckung in %	100	99,6	99,4	98,7	49,9
FCD-Strecke in 10^6 km	24,08	4,89	2,87	0,65	0,79

Aus der Analyse geht ebenfalls hervor, dass auf den SK1 bis SK4 für fast alle Kanten ($\geq 98,7\%$) mindestens eine FCD-Information in dem 14-Tage-Zeitraum vorhanden ist (hier bezeichnet als Abdeckung). Eine Ausnahme bildet SK5, die sich komplementär zu SK1 zu verhalten scheint. Die Kanten mit SK5 repräsentieren etwa drei Viertel der Streckennetzlänge, aber auf ihnen wird nur 2,4% der FCD-Strecke zurückgelegt, was sich in einer vergleichsweise geringen Abdeckung von etwa 50% widerspiegelt. Dies unterstreicht die Motivation des hier gewählten Vorgehens, Strecken implizit je nach Verkehrsaufkommen zu gewichten, indem die Routen von der Bevölkerungsdichte abhängen. Insgesamt werden in dem 14-Tage-Zeitraum im Evaluierungsgebiet $33,28 \cdot 10^6$ km gefahrene Strecke in den FCD erfasst. Auf jeder Kante im betrachteten Gebiets wird stündlich über einen zweiwöchigen Zeitraum hin die Anzahl der vorbeigefahrenen PKW ermittelt (s. Tabelle 5.2).

Laut Mobilitätsbericht kann in Nordrhein-Westfalen für das Jahr 2015 im Mittel mit 61.377 Kraftfahrzeugen auf Autobahnen pro 24h Zeitraum bei einem Schwerverkehrsanteil von 13% gerechnet werden [65]. Werden die nach Abzug des Schwerverkehrs verbleibenden Fahrzeuge als ausschließlich PKW aufge-

Tabelle 5.2: Eigenschaften der als Referenz verwendeten FCD

Eigenschaft	Ausprägung
Erfassungszeitraum	2 Wochen (07.10. - 20.10.2019)
berücksichtigte Fahrzeugtyp(en)	nur PKW
räumliche Aggregation von Datenpunkten	pro Fahrzeug und Kante
zeitliche Aggregation pro Kante	60 Minuten

fasst, lässt sich daraus ableiten, dass ein Anteil von etwa 14,4% der Fahrstrecke durch die FCD abgedeckt wird. Wird wie eingangs erwähnt angenommen, dass jeweils die ganze Fahrt durch die FCD erfasst wird, kann der Anteil der Fahrstrecke gleich dem Anteil der Fahrzeuge gesetzt werden, die zur Erzeugung der FCD beitragen. Dieser Anteil wird als realistisch eingeschätzt, was somit die FCD plausibilisiert.

5.3.4 Vergleichende Bewertung der Verfahren zur Routengenerierung

Die Routen werden nach den Verfahren STO (vgl. 5.3.1) und DKM (vgl. 5.3.2) generiert. Beim Blick auf das Evaluierungsgebiet lässt sich eine gleichmäßige Abdeckung mit Routen aus der DKM erkennen (exemplarisch dargestellt für DKM2, s. Abb. 5.6). Die STO-Routen weisen regionale Häufungen im nördlichen (Zellen 13, 14, und 15) sowie östlichen (Zellen 7, 8 und 11) Teil des Evaluierungsgebiets auf.

Um die einzelnen Verfahren miteinander zu vergleichen, werden drei Kriterien definiert, welche die vorgegebenen Ziele (vgl. 5.1) der RGE quantitativ abbilden sollen. Die Repräsentativität wird im Anschluss separat bewertet.

- Streckenlänge I_{RGE} : Die Summe der Längen der Segmente aus der RGE, die innerhalb des Evaluierungsgebiets liegen.

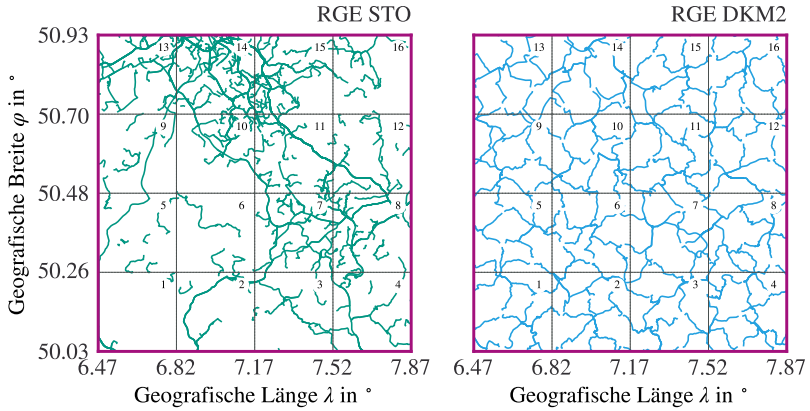


Abbildung 5.6: Generierte Routen mit STO (links) und DKM2 (rechts) bei $n_s = 10.000$ und Fokus auf das in 16 GZ unterteilte Evaluierungsgebiet (vgl. Abb. 5.5 sowie Abb. A.3).

- Abdeckungseffektivität θ_{RGE} : Der Anteil des Streckennetzes, der mindestens einmal abgedeckt ist, bezogen auf die Gesamtlänge des Streckennetzes innerhalb des Evaluierungsgebiets.
- Abdeckungseffizienz η_{RGE} : Der Anteil des Streckennetzes, der mindestens einmal abgedeckt ist, bezogen auf l_{RGE} .

Bei der Betrachtung bleibt die Fahrtrichtung auf einem Streckensegment unberücksichtigt. Das bedeutet, dass es für die Erfüllung der Abdeckung hinreichend ist, wenn ein Streckensegment in eine Richtung befahren wird. Außerdem werden alle Streckensegmente der SK5 ausgeschlossen, da diese SK z.B. auch Feldwege und Parkplätze enthält, die für die Untersuchungen irrelevant sind (vgl. 2.5.2) und somit die Bewertungskriterien negativ beeinflussen würden.

Insbesondere zwischen den einzelnen DKM-Varianten sind Unterschiede in allen Bewertungskriterien feststellbar (s. Tab. 5.3). Je kleiner der Radius r_d gewählt wird, desto mehr Destinationskreise verteilen sich im Evaluierungs-

Tabelle 5.3: Quantitativer Vergleich der Verfahren zur Routengenerierung (RGE) hinsichtlich der Zielmetriken Streckenlänge l_{RGE} , Abdeckungseffektivität θ_{RGE} sowie Abdeckungseffizienz η_{RGE}

Verfahren	l_{RGE} in km	θ_{RGE} in %	η_{RGE} in %
STO	4.760	24,2	57,2
DKM1	11.187	60,0	60,2
DKM2	2.997	21,7	81,1
DKM3	5.972	31,5	59,1
DKM4	747	5,7	85,4
DKM5	1.233	8,2	74,6

gebiet und desto größer werden l_{RGE} und θ_{RGE} . Die STO-Routen weisen eine vergleichsweise schlechte Abdeckungseffizienz η_{RGE} auf. Dieses Verhalten entspricht den Erwartungen, da Streckensegmente in Ballungsgebieten in der RGE implizit bevorzugt ausgewählt werden und somit vermehrt Doppelungen auftreten können.

Zur Bewertung der Repräsentativität werden zwei Kategorisierungen vorgenommen (vgl. 5.2.4):

- Gitterzelle (GZ): $GZ = (n_\varphi, n_\lambda) \in \mathbb{N}^2$ und $n_\varphi = n_\lambda$
- Straßenkategorie: $SK \in \{SK1, SK2, SK3, SK4, SK5\}$

Das Evaluierungsgebiet wird in 16 GZ ($n_\varphi = n_\lambda = 4$) eingeteilt (s. Abb. 5.6). Wird der relative Streckenanteil $l_{rel,z}$ pro GZ z und pro Verfahren zur RGE mit der Verteilung der Häufigkeiten aus den FCD verglichen, wird der Unterschied zwischen STO und DKM erkennbar (s. Abb. 5.7). Die Ergebnisse zeigen für die DKM2 eine geringere Varianz der Streckenanteile zwischen den einzelnen GZ. Für die STO-Routen zeigen bestimmte GZ eine erhöhte Häufigkeit (GZ: 7, 8, 11, 14, 15), was die qualitativen Beobachtungen bei Analyse von Abbildung 5.6 bestätigt. Die STO-Routen scheinen sich besser mit der FCD-

Referenz zu decken als die DKM-Routen. Wegen der Übersichtlichkeit ist in der Grafik nur eine der fünf Varianten (DKM2) abgebildet.

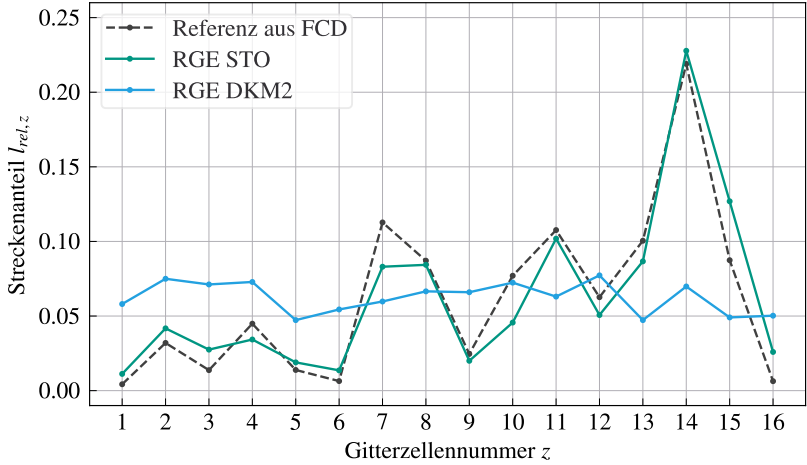


Abbildung 5.7: Vergleich der Streckenanteile pro geografischer Zelle (vgl. Abb. 5.6) für zwei Routengenerierungsverfahren und die Referenz aus Verkehrsschwarmdaten (FCD)

Wird das gleiche Verfahren auch auf die Kategorisierung bezüglich der SK durchgeführt, zeigen sich für STO ebenfalls Varianzen zwischen den einzelnen SK (s. Abb. A.4). Allerdings sind diese auch bei der DKM vorhanden.

Um diese Eindrücke zu quantifizieren, werden beide Kategorisierungen auf alle Verfahren zur RGE angewendet und hinsichtlich des MSE und des Chi-Quadrat-Homogenitätstests bewertet (vgl. 5.2.3). Die aufbereitete Verteilung der FCD dient dabei als Referenz (vgl. Abb. 5.1).

Mit dem Ziel, die Häufigkeit des Befahrens von Segmenten des Streckennetzes zu bewerten, muss bei den als Aggregationsbasis verwendeten Kanten ihre variierende Länge berücksichtigt werden. Daher werden in dem Verfahren nach Abb. 5.1 in Schritt 7 mit einer Kantenlängen-proportionalen Stichprobe¹⁵

¹⁵ Engl. probability proportionate to size (pps)

Tabelle 5.4: Parameter zur Durchführung des Chi-Quadrat-Homogenitätstests auf Basis von geografischen Zellen (GZ) sowie der Straßenkategorie (SK): Anzahl der Kategorien n_{Kat} , Freiheitsgrad f , Signifikanzniveau α , Quantil der Chi-Quadrat-Verteilung $\chi^2_{f;1-\alpha}$.

Kategorisierung	n_{Kat}	f	$1 - \alpha$	$\chi^2_{f;1-\alpha}$
GZ	16	15	0,95	25,00
SK	5	4	0,95	9,49

aus beiden Informationsquellen (GT und VR) Elemente gezogen [78]. Die Elemente in der Grundgesamtheit besitzen demnach nicht die gleiche Wahrscheinlichkeit gezogen zu werden, sondern es gilt für die Wahrscheinlichkeit p_i , die Kante i zu ziehen

$$p_i = \frac{l_{e,i}}{L_e}, \quad \text{mit } l_{e,i} \in \mathbb{R}, \quad \text{und } L_e = \sum_{i=1}^{N_e} l_{e,i}, \quad (5.6)$$

mit der Kantenlänge $l_{e,i}$, der Gesamtlänge L_e aller Kanten in der jeweiligen Grundgesamtheit und der Gesamtzahl N_e der Kanten.

Die für den Chi-Quadrat-Homogenitätstest benötigte Teststatistik χ^2_{emp} wird für STO sowie die fünf DKM-Varianten jeweils anhand der Formel 5.3 und den definierten Parametern (vgl. Tabelle 5.5) bestimmt. Die dafür nötige Stichprobe wird proportional zur Anzahl der Kategorien n_{Kat} zu $n_{s,eval} = 50 \cdot n_{Kat}$ definiert. Der Vergleich von χ^2_{emp} mit dem Quantil der Chi-Quadrat-Verteilung $\chi^2_{f;1-\alpha}$ (vgl. Tabelle 5.5) ergibt, dass für keines der untersuchten Verfahren bezüglich der beiden gewählten Kategorisierungen (GZ und SK) der statistische Nachweis erbracht werden kann, dass die Stichproben (GT und VR) aus der gleichen Grundgesamtheit stammen.

Dennoch lässt sich bei Betrachtung von $\chi^2_{GZ,emp}$ ein Unterschied in der Höhe der Teststatistik zwischen STO und DKM feststellen. Dies motiviert die zusätzliche Betrachtung des MSE zwischen den virtuell erzeugten Routen und der Referenz aus FCD. Bezogen auf die Kategorisierung anhand der GZ, liegt

Tabelle 5.5: Vergleichende Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse der untersuchten Verfahren zur Routengenerierung für die Kategorisierung nach geografischer Zelle (GZ) sowie nach Straßenkategorie (SK).

Verfahren	$\chi^2_{GZ,emp}$	$\chi^2_{SK,emp}$	$MSE_{l_{rel},GZ}$	$MSE_{l_{rel},SK}$
STO	46,1	44,6	0,30	20,45
DKM1	291,9	276,3	2,96	116,26
DKM2	274,5	197,6	2,99	102,58
DKM3	296,0	172,6	3,09	102,35
DKM4	228,3	67,5	3,42	32,27
DKM5	325,1	52,7	3,39	23,7

der $MSE_{l_{rel},GZ}$ von STO etwa um den Faktor 10 niedriger als der Wert für die DKM (vgl. Tabelle 5.5). Diese Auswertung entspricht der Aggregation der Ergebnisse aus Abbildung 5.7 über alle GZ.

Die RGE via STO basiert auf einer Routenlängenverteilung als Input (s. Abb. 5.3). Diese wird nun abschließend mit den Routenlängenverteilungen der generierten Routen (STO, DKM2) verglichen (s. Abb. 5.8). Während Referenz und STO nah beieinander liegen, ergeben sich relativ betrachtet größere Abweichungen zwischen Referenz und DKM2. Kurze Routen ($l_{Route} < 10\text{ km}$) sind prinzipbedingt gar nicht vorhanden und somit unterrepräsentiert. Routen mit $10\text{ km} \leq l_{Route} < 25\text{ km}$ ergeben etwa 80% der insgesamt simulierten Strecke und sind somit stark überrepräsentiert im Vergleich zur Referenz. Diese Auswertung bestätigt die angenommene Repräsentativität des STO und verifiziert das Vorgehen der stochastischen Routenlängengenerierung anhand der gegebenen empirischen Verteilung (s. Abb. 5.3).

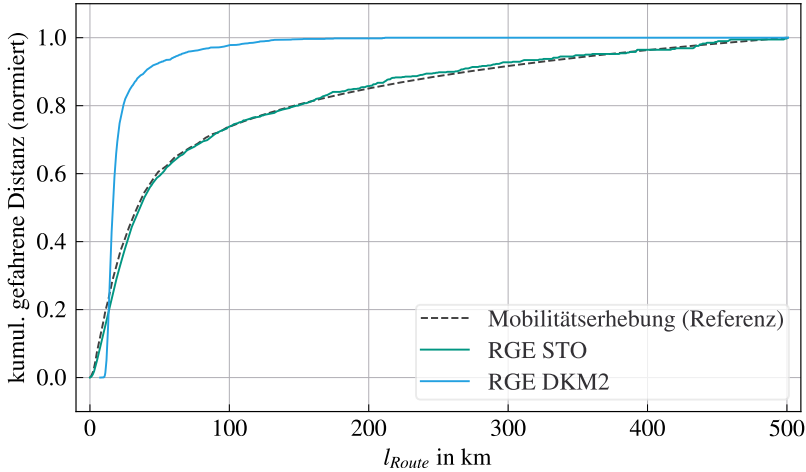


Abbildung 5.8: Verteilung der normierten kumulierten gefahrenen Distanz über der Routenlänge für STO und DKM2 relativ zur Referenz aus der Mobilitätserhebung

5.3.5 Diskussion der Ergebnisse der Verfahren zur Routengenerierung

Da die Anforderungen an die RGE je nach Anwendungsfall variieren, werden in Kapitel 5 verschiedene Verfahren und Bewertungsmetriken zur RGE vorgestellt. Je nach Wahl der Parameter, lassen sich mit der DKM im Vergleich aller Verfahren die besten Kompromisse aus Abdeckungseffektivität θ_{RGE} sowie Abdeckungseffizienz η_{RGE} erzielen (z.B. $\theta_{RGE,DKM1} = 60,0$ und $\eta_{RGE,DKM1} = 60,2$, vgl. Tabelle 5.3). Hinsichtlich der ebenfalls quantitativ untersuchten Repräsentativität liegt das STO-Verfahren vor allen DKM-Varianten (vgl. 5.3.4). Da das Kriterium Repräsentativität in der hier untersuchten Anwendung im Fokus steht, wird für die RGE innerhalb der Gesamtmethode zur skalierbaren Funktionsvalidierung mit repräsentativer Szenarioverteilung (vgl. Abb. 4.2) die STO-Methode ausgewählt.

Der statistische Nachweis für die Repräsentativität unter Nutzung der FCD als Referenz wird nicht erbracht. Dennoch zeigt die relative Betrachtung zwischen den untersuchten Verfahren, dass die Repräsentativität bezüglich der eingeführten Kategorien bei STO höher ist als bei der DKM. Mit Blick auf die Kategorisierung auf Ebene der SK weisen auch zwei DKM Verfahren (DKM4 und DKM5) einen Fehler $MSE_{l_{rel},SK}$ auf, der in der Größenordnung wie der von den STO-Routen liegt. Dies könnte für Anwendungen relevant sein, in denen die geografische Repräsentativität eine untergeordnete Rolle spielt, aber die lokale Repräsentativität hinsichtlich der SK möglichst effizient (mit hohem η_{RGE}) erzielt werden soll. Die zuvor noch offene Frage (vgl. 4.6), ob beim neuen Framework zur Funktionsvalidierung die Anforderung nach Repräsentativität ([Req9]) erfüllt wird, kann jetzt positiv beantwortet werden. Somit ist FF1 nun als vollständig gelöst zu betrachten.

Auch die FF2 (vgl. 1.2) wird mit den untersuchten Ansätzen zur RGE und Bewertung beantwortet. Es werden die unterschiedlichen Verfahren zur RGE betrachtet (vgl. 2.7), implementiert (vgl. 5.3) sowie eine Methode (vgl. 5.2) und Kriterien zur Bewertung der Nutzbarkeit bei der Funktionsvalidierung (vgl. 5.3.4) erarbeitet.

Die Methode zur Bewertung der RGE beruht auf der Verwendung von FCD, für die eine Reihe notwendiger Annahmen hinsichtlich ihrer Qualität vorausgesetzt wird (vgl. 5.2.2). Da für die Untersuchungen keine GT zur Überprüfung der Qualität der FCD zur Verfügung steht, kann kein formaler Nachweis für die Verwendbarkeit der FCD und somit für die Ergebnisse der Analyse der Repräsentativität erbracht werden.

Dennoch scheinen die Ergebnisse plausibel, da die Routen, die auf Basis der Bevölkerungszahl Ψ und der Routenlängenverteilung $p(l)$ generiert werden, mit dem FCD-Datensatz auf Basis der GZ im Evaluierungsgebiet übereinstimmen. Alle verwendeten Datensätze (Ψ , $p(l)$, FCD) sind unabhängig voneinander entstanden.

Die Tatsache, dass die mit STO generierten Routen auf SK1 relativ zur FCD-Referenz unterrepräsentiert sind (Abweichung > 20 Prozentpunkte, vgl. Abb. A.4),

motiviert weiterführende Forschung, die über diese Ausarbeitung hinaus geht. Eine denkbare, aber noch zu untersuchende Erklärung wäre eine Überrepräsentation von SK1 in den FCD, die sich durch einen vermehrten Einsatz von Navigationsgeräten auf längeren Strecken (und somit bevorzugt SK1) erklären ließe. Es wäre auch möglich, dass die verwendete Routenlängenverteilung nicht auf das betrachtete Untersuchungsgebiet anwendbar ist. Grundsätzlich gilt für alle Anwendungen dieser Methode zur RGE und Validierung der Repräsentativität von Routen, dass die Ergebnisse direkt abhängig sind von den zur Verfügung stehenden Schwarm-, Karten- sowie demografischen Daten.

6 Skalierbare und repräsentative Funktionsvalidierung mit virtuellen Testfahrten

Die Validierung ist die Überprüfung, ob das entwickelte System die Nutzeranforderungen erfüllt (vgl. 3.1). Stellt sich allerdings erst am Ende der Entwicklung heraus, dass die Nutzerakzeptanz nicht gegeben ist, sind Verzögerungen beim Produktionsstart und Kosten für die notwendige Neuentwicklung zu erwarten. Daher sollte ein Teil der Validierungsumfänge möglichst schon in der Definitionsphase sowie begleitend zur Produktentwicklungsphase (vgl. 2.3) stattfinden.

Die skalierbare und repräsentative Funktionsvalidierung basiert auf dem Konzept von virtuellen Testfahrten auf realen Routen (vgl. 4.5) anhand der RVT und kann je nach Anwendungsfall in unterschiedlichen Phasen des Fahrzeugprojekts zum Einsatz kommen. Die vorliegende Anwendung des RVT-Frameworks (vgl. 4.5.2) folgt den zuvor definierten Prozessschritten von der Entwicklung [EAP.1] bis zur Ergebnisanalyse [EAP.4] (s. Abb. 4.3).

Dabei werden folgende Schritte detailliert betrachtet:

- Abschnitt 6.1 und 6.2: [EAP.1] mit Fokus auf das Modell des SUT [F3]
- Abschnitt 6.3: [EAP.2] und [EAP.3]
- Abschnitt 6.4: [EAP.4]

6.1 Anwendungsfall: Bewertung des PCC-Featureumfangs mit Hilfe des RVT-Frameworks

Das in Abschnitt 4.5 hergeleitete Konzept beschreibt ein Framework, das dazu herangezogen werden kann, bisherige Validierungsmethoden zu unterstützen. Daher wird ein Anwendungsfall gewählt, der mit konventionellen Validierungsmethoden nicht abgedeckt werden kann, um den exemplarischen Nachweis für das Konzept zu erbringen. Die Definition des Untersuchungsziels beinhaltet die Festlegung der Funktionsfeatures, der geografischen Region sowie der Evaluierungsmetriken (vgl. [EAP.1](SYS.1) in Abb. 4.3). Da das Konzept (vgl. 4.5) bereits anhand der besonderen Anforderungen prädiktiver Fahrfunktionen motiviert und hergeleitet ist, wird als Anwendungsfall ebenfalls eine prädiktive Fahrfunktion gewählt. Der Anwendungsfall ist die Erweiterung eines ACC um prädiktive Features hin zu einer neuen Generation von PCC. Der ACC wiederum baut auf den grundlegenden Features einer Geschwindigkeitsregelanlage (GRA)¹ zum Halten einer vorgegebenen SG auf, indem auch auf bewegte und ggfs. stehende Zielobjekte reagiert wird (s. Abb. 6.1).

Die Nutzbarkeit und der Mehrwert der PCC hängen wesentlich vom Betriebsbereich der PCC, also dem Umfang und der Ausgestaltung der prädiktiven Features ab, welche die resultierende ODD beeinflussen (vgl. 2.2.1). Je größer die spezifizierte ODD sein soll, desto größer müssen der Featureumfang und desto weiter die Systemgrenzen gewählt werden, was den Entwicklungsaufwand sowie gegebenenfalls die benötigten Sensorumfänge erhöht. Es gibt also einen Zielkonflikt zwischen Entwicklungs- und Produktionskosten einerseits und andererseits dem Mehrwert für den Nutzer, welcher über die Ausgestaltung der ODD beeinflusst wird.

In diesem Kontext soll das RVT-Framework genutzt werden, um den Zusammenhang zwischen ODD und dem resultierenden Mehrwert für den Nutzer zu

¹ auch bekannt als Tempomat

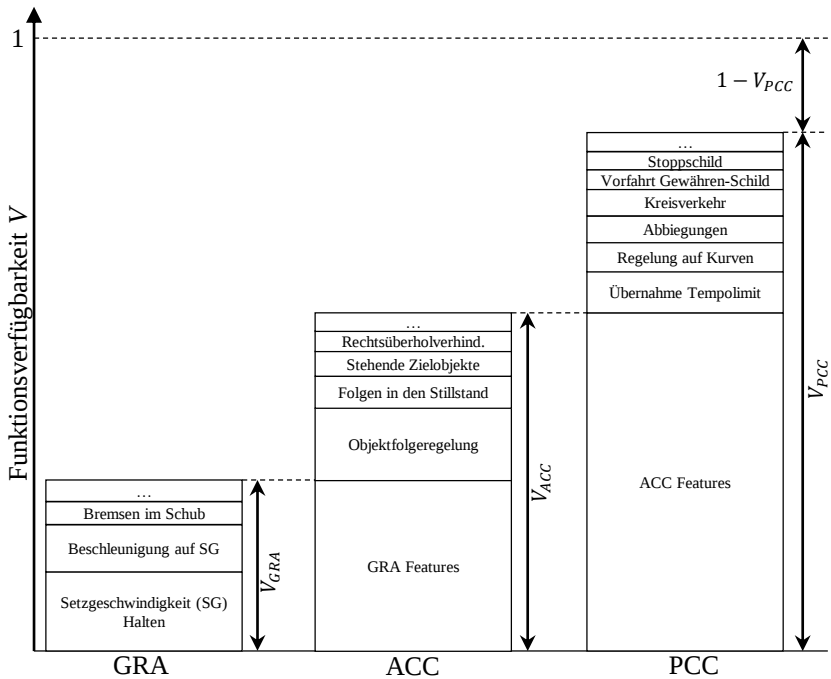


Abbildung 6.1: Relative zeitliche Funktionsverfügbarkeit V abhängig vom Featureumfang der aufeinander aufbauenden Fahrfunktionen GRA, ACC und PCC. Die Funktionsverfügbarkeit ist nur qualitativ dargestellt, die Höhe der Featureblöcke quantifiziert nicht maßstabsgetreu die tatsächlichen Funktionsverfügbarkeiten V_{GRA} , V_{ACC} und V_{PCC} .

analysieren² und somit auch die FF3 (vgl. 1.2) zu beantworten. Dazu werden regionsübergreifend die Metriken (für [F5], s. Abb. 4.2) Verfügbarkeit, Erlebbarkeit und die Häufigkeit von notwendigen Fahrereingriffen je nach gewählter ODD untersucht [133]. Als geografische Untersuchungsregion wird Westeuropa herangezogen.

² Die Ermittlung des Zusammenhangs zwischen ODD und Entwicklungskosten wird hier explizit nicht betrachtet.

Definition 6.1 (Verfügbarkeit). Die Verfügbarkeit V_{PCC} sei definiert als Zeitanteil der Gesamtfahrzeit, zu dem die Fahrfunktion aktiviert werden kann und ergibt sich aus den Teilzeiten $t_{v,i}$ sowie $t_{nv,i}$, in denen die Funktion verfügbar, bzw. nicht verfügbar ist. Ist das System verfügbar, befindet es sich innerhalb der erkennbaren ODD (vgl. 2.2.1).

$$V_{PCC} = \sum_{i=1}^N t_{v,i} / \sum_{i=1}^N (t_{v,i} + t_{nv,i}) \quad (6.1)$$

Definition 6.2 (Erlebbarkeit). Mit der Erlebbarkeit E_{PCC} soll die Verbesserung der Verfügbarkeit der PCC im Vergleich zum ACC bezeichnet werden. Die Erlebbarkeit sei definiert als Zeitanteil der Gesamtfahrzeit, zu dem die Fahrfunktion aktiviert ist, aber nicht konstant bei SG fährt. Sie ergibt sich aus den Teilzeiten $t_{e,i}$ sowie $t_{ne,i}$, in denen die Funktion erlebbar, bzw. nicht erlebbar ist. Jedes Mal, wenn die Fahrfunktion wegen eines prädiktiven Events die Geschwindigkeit reduzieren muss, sei sie erlebbar.

$$E_{PCC} = \sum_{i=1}^N t_{e,i} / \sum_{i=1}^N (t_{e,i} + t_{ne,i}) \quad (6.2)$$

Mit der Erlebbarkeit wird also der Mehrwert einer PCC gegenüber einer konventionellen GRA quantifiziert.

Um zu beschreiben, wie oft der Fahrer trotz aktiver PCC noch in die Längsführung des Fahrzeugs eingreifen muss (Übernahmehäufigkeit), wird im Gegensatz zu den vorherigen Metriken kein relativer Zeitanteil herangezogen, da diese Eingriffe meist nur sehr kurz sind und eine Zeitangabe somit kein aussagekräftiger Indikator wäre.

Definition 6.3 (Übernahmehäufigkeit). Die Übernahmehäufigkeit I_{PCC} sei definiert als die Anzahl der notwendigen Übernahmen n der Fahrzeuglängsführung durch den Fahrer pro Zeiteinheit t . Im Falle einer erkennbaren ODD fordert das System den Fahrer zur Übernahme auf (vgl. 2.2.1). Bei einer nicht er-

kennbaren ODD muss der Fahrer im Rahmen seiner überwachenden Funktion ein Verlassen der ODD selbstständig detektieren und die Längsführung korrigieren.

$$I_{PCC} = n/t \quad (6.3)$$

Der beschriebene Anwendungsfall der RVT ist im V-Modell oben links im Systems Engineering-Schritt SYS.1 einzuordnen (vgl. 2.3). Denn bevor die inhaltliche Entwicklung startet, müssen zunächst die Systemanforderungen definiert sein.

Es wird angenommen, dass der ACC über folgende Betriebsmodi verfügt:

- Freifahrt (entspricht den GRA Features in Abb. 6.1)
 - Beschleunigung auf SG
 - SG halten (Konstantfahrt, inkl. Bremsen im Schubbetrieb)
- Folgefahrt (zusätzliche ACC Features in Abb. 6.1)
 - Stationär bei gegebener Zeitlücke und Annäherung an ein bewegtes Zielobjekt (Objektfolgeregelung)
 - Folgeregelung in den Stillstand
 - Annäherung an ein stehendes Zielobjekt (z.B. an einer Lichtsignalanlage (LSA))
 - Rechtsüberholverhinderung (je nach Land und Rechts-/Linksverkehr)

Der ACC hält die eingestellte SG bei Freifahrt. Bei Annäherung an ein langsames Zielobjekt wird auf das Zielobjekt reagiert und in die Folgefahrt überleitet, sodass der Fahrer in solchen Situationen im Allgemeinen nicht korrigierend in die Fahrzeuglängsregelung eingreifen muss³. In Freifahrt muss der Fahrer jedes Mal dann eingreifen, wenn die aktuell eingestellte SG nicht angemessen für den jeweiligen Streckenverlauf ist. In solchen Fällen bietet die PCC

³ Im Falle einer Fehlerkennung der Wahrnehmung muss der Fahrer gegebenenfalls dennoch korrigierend eingreifen.

prädiktive Features (s. Abb. 6.2), die auch in Freifahrt eine automatische Geschwindigkeitsanpassung übernehmen und den Fahrer somit entlasten. Wäh-

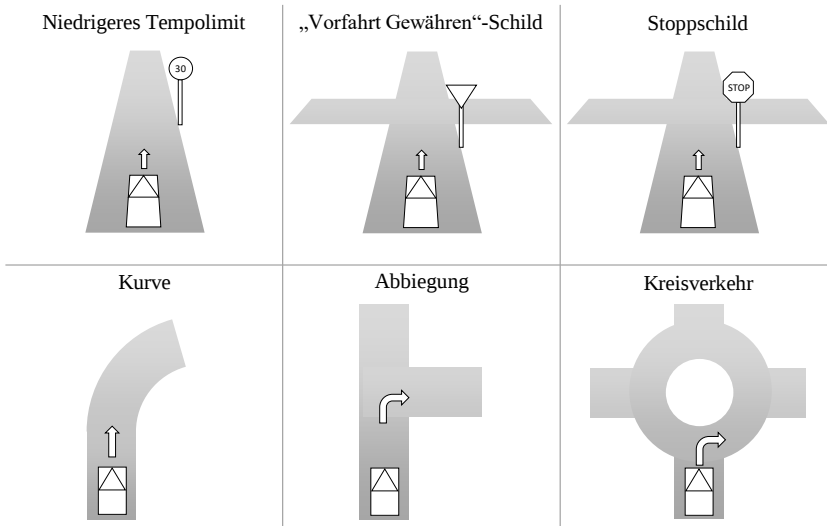


Abbildung 6.2: Prädiktive Szenarien

rend die Geschwindigkeitsreduktion in den oberen drei Szenarien in Abb. 6.2 primär aufgrund von gesetzlichen und Vorfahrtregelungen notwendig ist, ist sie in den unteren drei Szenarien aufgrund des geometrischen Verlaufs des Fahrstreifens primär physikalisch motiviert⁴.

Unter Anwendung des RVT-Frameworks wird nun untersucht, welchen Mehrwert die Vergrößerung der ODD durch die genannten Funktionsfeatures für den Nutzer mit sich bringt. Die obige Auswahl von Szenarien sei gesetzt für den vorliegenden Anwendungsfall. Je nach Fragestellung können diese Szenarien als Parameter in [EAP.2] (s. Abb. 4.3) variiert oder erweitert werden.

Die Konfiguration der virtuellen Routen (für [F1], s. Abb. 4.2) basiert auf der regionalen Verteilung der Bevölkerungsdichte und Routenlängenverteilung

⁴ Diese sechs Szenarien werden initial untersucht, da eine hohe Auftretenshäufigkeit erwartet wird. Für eine genauere Analyse möglicher Szenarien siehe Abschnitt 6.3

(vgl. 5.3.1). Für die Analyse wird davon ausgegangen, dass die so generierten Routen repräsentativ für das Verhalten der durchschnittlichen Nutzer des Systems sind (RVT).

6.2 Modellierung des SUT

Mit dem definierten Untersuchungsziel, der Fahrfunktion inklusive der Features sowie den Evaluierungsmetriken kann nun anhand des vorgestellten Prozesses (vgl. 4.4) mit der Modellentwicklung (vgl. 3.1) begonnen werden. Das Modell wird implementiert [EAP.1] (s. Abb. 4.3) und anschließend in das RVT-Framework (in [F3], s. Abb. 4.2) integriert, sodass die konfigurierte Fahrfunktion simuliert werden kann. Der Routengenerator (für [F1], s. Abb. 4.2) ist bereits vorhanden (vgl. 5.3.5). Die übrigen Bestandteile für [EAP.1] (s. Abb. 4.3) werden ebenfalls erstellt, stehen in der Dissertation aber nicht im Fokus.

6.2.1 Ziele und Randbedingungen bei MiL-Simulation

Ziel der Simulation ist es, im Rahmen der RVT die generierten Routen „virtuell abzufahren“ und auf das dabei erzeugte Verhalten des SUT die Metriken (vgl. 6.1) anzuwenden. Das gesuchte Modell des SUT soll also in der Lage sein, den Output des Umgebungsmodells so zu verarbeiten, dass daraus die benötigten Eingangsgrößen der Metriken hervorgehen. Konkret muss das Modellsystem somit folgende Aspekte abbilden (Modellzweck):

[Req16] Auftretenshäufigkeit der Szenarien - Die Auftretenshäufigkeit der funktionalen Szenarien soll bei der virtuellen Testfahrt genauso hoch sein wie bei der realen Testfahrt auf derselben Route unter Annahme von Freifahrt.

[Req17] Zeitdauer der Szenarien - Die relative Abweichung der zeitlichen Dauer der konkreten Szenarien zwischen virtueller und realer Testfahrt auf derselben Route soll möglichst klein sein. Da auch leichte systematische Abweichungen noch eine Aussage relativ zur Region zulassen, wird eine mittlere

Abweichung von maximal 5% toleriert. Dafür wird angenommen, dass die Abweichung nicht regionsabhängig ist.

Da das aus Kartendaten gespeiste Umgebungsmodell die Eingangsgrößen nicht im gleichen Umfang wie im Fahrzeug zur Verfügung stellt⁵, sind Abstraktionen im Modell des SUT ohnehin notwendig. Als Softwarekomponente im Fahrzeug enthält das SUT zur Umsetzung der PCC-Funktionalität die Module

- Trajektorienplanung
- Längsdynamikregelung
- Zustandsautomat (inkl. Überwachung der Systemgrenzen)
- Nutzerschnittstelle (inkl. Anzeige und Bedienlogik)
- Diagnose.

Um die beiden zuvor definierten Anforderungen (Auftretenshäufigkeit und Zeitdauer der Szenarien) zu erfüllen, ist jedoch die Trajektorienplanung ausreichend, da die Häufigkeit und die Zeitdauer der Szenarien aus dem Output der Trajektorienplanung abgeleitet werden. Daher wird das Modellsystem auf das Modul Trajektorienplanung reduziert. Zusätzlich werden Teile des Zustandsautomaten abgebildet, um ein Überschreiten der Systemgrenzen im Modell berücksichtigen zu können.

6.2.2 Längsdynamisches Modell für die MiL-Simulation

Der logische Aufbau der PCC kann dem Architekturschaubild (vgl. 2.6.2) entnommen werden. Wegen der in der Simulation nicht vorhandenen Onboard-Sensorik, muss davon ausgegangen werden, dass die Karteninformationen vollständig korrekt sind (ideale Wahrnehmung). Im Gegensatz zur RVT treten im

⁵ Im Fahrzeug wird über die Onboard-Sensorik ebenfalls ein Umgebungsmodell erstellt, das redundant zu den Karteninformationen ist und mit diesen fusioniert wird (vgl. 2.13). Im Rahmen des RVT-Ansatzes die liegt die Onboard-Information nicht vor und muss daher vernachlässigt werden.

Fahrzeug während eines FOT folgende Fehler, bzw. Ungenauigkeiten bei der Wahrnehmung auf (vgl. 2.6.2):

- Fehler in den Kartendaten, die auf Fehler bei der Erstellung oder durch Alterung der Kartendaten zurückgeführt werden können (z.B. Abweichung bei Kurvenkrümmung oder falsche Tempolimitwerte)
- Ungenauigkeiten bei der Lokalisierung des Egofahrzeugs relativ zur Karte
- Messfehler der Onboard-Sensorik

Ungenauigkeiten bei der Lokalisierung werden im FOT durch die Onboard-Sensorik kompensiert. Daher wird angenommen, dass die ideale Lokalisierung im Modell akzeptiert werden kann. Auch die Fehler in den Kartendaten werden im FOT konzeptbedingt durch die Fusion mit der Onboard-Sensorik korrigiert. Im Simulationsmodell findet diese Korrektur nicht statt. Lokal (auf einzelnen Kanten) werden in der Simulation also Abweichungen aufgrund fehlerhafter Kartendaten erwartet. Wird allerdings angenommen, dass die Fehler in den Kartendaten nicht systematischer Natur sind und relativ zur Gesamtstrecke selten auftreten, können diese Anomalien mit der Einschränkung, dass Bewertungen über ganze virtuelle Testfahrten und nicht einzelne Kanten vorgenommen werden, akzeptiert werden. Wird z.B. eine sechs Monate alte Karte verwendet, so sind die Tempolimits zwar lokal potenziell fehlerhaft, da veraltet, aber global immer noch valide, unter der Annahme, dass sich die Verteilung der Tempolimits über alle Kanten nicht ändert.

Wird zusätzlich eine ideale Aktorik angenommen, entspricht die geplante Trajektorie automatisch auch der tatsächlich gefahrenen Trajektorie. Unter diesen Annahmen kann das Modellsystem erheblich vereinfacht werden. Es genügt eine einzige Trajektorie, um die gesamte Route zu planen. Unter realen Bedingungen (FOT) müsste die Trajektorie beim Befahren der Route in regelmäßigen Abständen neu geplant werden, da es zu Abweichungen zwischen Soll- und Istgeschwindigkeit kommt. Zusätzlich ist der Vorausschauho-

horizont im realen Fahrzeug durch die Onboard-Sensorik mit limitierter Reichweite begrenzt. Wird nur eine Planung und keine Regelung durchgeführt, ist auch die Rückführung der Bewegungsgrößen aus der Regelstrecke nicht notwendig, sodass sich die resultierende logische Systemarchitektur (s. Abb. 6.3) stark vereinfacht. Bei der Geschwindigkeitsplanung wird die MPC (vgl. 2.6.2)

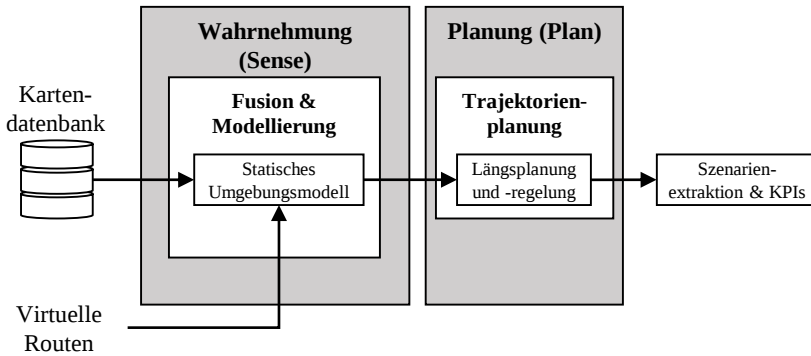


Abbildung 6.3: Reduzierte logische Systemarchitektur zur Modellierung der PCC, die sich aus der vollständigen Architektur in Abb. 2.13 durch die vereinfachenden Annahmen ableitet.

mit der multikriteriellen Optimierung lediglich durch Sequenzen konstanter Beschleunigung abgebildet. Dadurch sind potenziell Abweichungen im Geschwindigkeitsverlauf zwischen Modell und Realität zu erwarten. Allerdings wird angenommen, dass die Abweichungen so gering sind, dass die für den Modellzweck relevanten Zeitpunkte von Szenariobeginn und -ende gültig modelliert sind. Diese Vereinfachung führt zu geringeren Laufzeiten⁶ des Modells bei der Simulation und hat zusätzlich den Vorteil, dass die PCC mit geringem Entwicklungsaufwand (vgl. [EAP.1] in Abb. 4.3) modelliert werden kann⁷. Im

⁶ Mit einer durchschnittlichen Hardware (Prozessor mit 2 Kernen, Intel® Core™ i5-7300U CPU @ 2.60GHz) wird ein Zeitfaktor von $f_{Sim} = 1009$ gegenüber der Echtzeit erreicht. Das bedeutet, dass eine virtuelle Fahrt von 17 Minuten Fahrdauer in etwa einer Sekunde simuliert wird.

⁷ Für eine alternative Modellierung der Geschwindigkeitsplanung anhand einer MPC wird auf vertiefende Literatur verwiesen, z.B. [9].

Rahmen der ohnehin notwendigen Verifikation (vgl. 6.2.3) wird überprüft, ob der Modellzweck für den Anwendungsfall trotz der Vereinfachung noch gegeben ist.

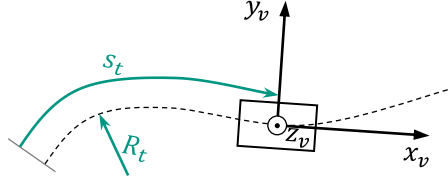


Abbildung 6.4: Kartesisches Fahrzeugkoordinatensystem entlang der Fahrzeugtrajektorie

Das Umgebungsmodell stellt die Umfeldinformationen entlang der Route in Abhängigkeit der Bahnkoordinate s_t als Strecke ab dem Startpunkt dar (s. Abb. 6.4). Das Fahrzeug muss nicht modelliert werden, da die Roll-, Nick-, Wank- und Gierbewegungen des Fahrzeugs genauso unberücksichtigt bleiben wie die Fahrzeugmasse. Das Fahrzeug wird auf einen Punkt reduziert, der sich entlang der geplanten Bahn mit gegebener Krümmung bewegt. Die Trajektorienplanung wird raumdiskret anhand der Streckenposition s berechnet, da Szenen entlang der Strecke über ihre Streckenposition relativ zur jeweiligen Ego-Fahrzeugposition referenziert werden können. Für die zurückgelegte Strecke $s_1 - s_0$ innerhalb der Zeit $t_1 - t_0$ gilt

$$s_1 - s_0 = \int_{t_0}^{t_1} v(t) dt. \quad (6.4)$$

Wird von einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung ausgegangen, wobei die Beschleunigung a_x innerhalb eines Zeitschrittes konstant ist, ergibt sich für die Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Zeit

$$v_1 = v_0 + a_x(t_1 - t_0), \quad (6.5)$$

bzw. in Abhängigkeit der diskreten Streckenposition⁸

$$v_1 = \sqrt{v_0^2 + 2a_x(s_1 - s_0)}. \quad (6.6)$$

Die Berechnung der Randbedingungen (engl. Constraints) bei der Trajektorienplanung (vgl. 2.6.2) für die prädiktiven Szenarien (s. Abb. 6.2) leitet sich aus Umgebungsgrößen sowie applizierbaren Parametern ab. Das gesetzlich vorgegebene Tempolimit $v_{max,TL}(s)$ soll von der PCC nicht überschritten werden und dient daher als Constraint

$$v_{max,TL}(s) = v_{TL}(s), \quad (6.7)$$

wobei das Tempolimit $v_{TL}(s)$ aus den Kartendaten gegeben ist. Um das Verhalten des menschlichen Fahrers abzubilden, reduziert das modellierte SUT bei Annäherung an ein Vorfahrt Gewähren-Schild (VG-Schild) die Geschwindigkeit auf den Wert $v_{Par,VG}$.

Mit der Menge $S_{VG} = \{s \mid \text{VG-Schild an Position } s \text{ vorhanden}\}$ folgt für den Constraint

$$v_{max,VG}(s) = \begin{cases} v_{Par,VG} & \text{falls } s \in S_{VG} \\ v_{Par,max} & \text{falls } s \notin S_{VG} \end{cases}. \quad (6.8)$$

Analog gilt für den durch Stoppschilder eingeführten Constraint

$$v_{max,Stopp}(s) = \begin{cases} v_{Par,Stopp} & \text{falls } s \in S_{Stopp} \\ v_{Par,max} & \text{falls } s \notin S_{Stopp} \end{cases}, \quad (6.9)$$

mit der Menge $S_{Stopp} = \{s \mid \text{Stoppschild an Position } s \text{ vorhanden}\}$. Es wird also das gleiche Verhalten wie bei VG-Schildern modelliert, lediglich der Zielgeschwindigkeitsparameter (vgl. 6.1) ist unterschiedlich.

⁸ Ergibt sich aus dem aufgelösten Integral aus Gleichung 6.4, umgestellt nach $(t_1 - t_0)$ und eingesetzt in Gleichung 6.5.

Bei gekrümmten Fahrstreifen ergibt sich ein physikalisch motivierter Constraint

$$v_{max,Kurve}(s) = \begin{cases} \sqrt{a_{y,max}R(s)} & \text{falls } |R(s)| > 0 \\ v_{Par,max} & \text{falls } |R(s)| = 0 \end{cases}, \quad (6.10)$$

der sich über den Verlauf der Fahrbahnkrümmung $R(s)$ und die maximale Zielquerbeschleunigung $a_{y,max}$ modelliert wird. Ein ähnliches Vorgehen wäre auch an Abbiegungen wünschenswert. Allerdings liefert die verwendete SD-Karte keinen kontinuierlichen Fahrstreifenkrümmungsverlauf an Abbiegungen (vgl. 2.5.3). Daher wird ersatzweise ein Modell auf Basis einer vom Abbiegewinkel $\delta(s)$ abhängenden Kennlinie $k(\delta)$ gewählt (vgl. A.6). Diesem Vorgehen liegt die Annahme zugrunde, dass je größer der Abbiegewinkel, desto kleiner der resultierende Bahnradius. Es gilt

$$v_{max,Abbiegung}(s) = v_{kenn,Abbiegung}(\delta(s)). \quad (6.11)$$

Für Kreisverkehre wird kein separater Constraint definiert, da dieser geometrisch als Sequenz von Abbiegungen und Krümmungen repräsentiert werden kann.

Die Einzelconstraints werden zum Gesamtconstraint

$$v_{constr} = \min(v_{max,TL}, v_{max,VG}, v_{max,Stopp}, v_{max,Kurve}, v_{max,Abbiegung}) \quad (6.12)$$

zusammengefasst, der an jeder raumdiskreten Position das Minimum aller Constraints darstellt.

Darauf basierend nutzt das Modell den hier entwickelten retrospektiven Trajektorienplanungsalgorithmus (vgl. Algorithmus 2), der in einem Vorwärts- und einem Rückwärtsschritt jeweils von lokalen Geschwindigkeitsminima ausgehend eine Trajektorie berechnet. Die Trajektorie basiert auf einer konstanten Beschleunigung $a_{x,pos}$ (bzw. $a_{x,neg}$ bei Verzögerungen) sofern die aktuelle Geschwindigkeit unterhalb der Constraint liegt. Auch wenn es sich um eine Verzögerung handelt, ist der Parameter $a_{x,neg} > 0$. Der geschwindigkeitsredu-

zierende Effekt wird durch den Rückwärtsschritt erzielt. Am Anfang und Ende der virtuellen Testfahrt wird jeweils die Geschwindigkeit v_0 als zusätzlicher Constraint vorgegeben. Zusammenfassend kann das Modellsystem also als

Algorithmus 2 Retrospektive Trajektorienplanung für eine PCC basierend auf Umfeldinformationen

```

1:  $v_{t,k=1} = v_0$ 
2:  $N \leftarrow \text{length}(s)$ 
3: for  $k \leftarrow 2$  to  $N - 1$  do
4:    $v_{\text{beschl},k} = \sqrt{v_{t,k-1}^2 + 2a_{x,\text{pos}}(s_k - s_{k-1})}$ 
5:    $v_{t,k} = \min(v_{\text{constr},k}, v_{\text{beschl},k})$ 
6: end for
7:  $v_{t,k=N} = v_0$ 
8: for  $k \leftarrow N$  to 2 do
9:    $v_{\text{beschl},k-1} = \sqrt{v_{t,k}^2 + 2a_{x,\text{neg}}(s_{k-1} - s_k)}$ 
10:   $v_{t,k-1} = \min(v_{\text{constr},k-1}, v_{\text{beschl},k-1}, v_{t,k-1})$ 
11: end for
12: result: Geplante Route  $v_{t,k}, k = 1 \dots N$ 

```

Tabelle 6.1: Im vorliegenden PCC-Anwendungsfall verwendete Parameterausprägungen zur Berechnung der Constraints sowie zur Geschwindigkeitstrajektorienplanung

Formelzeichen	Wert
$v_{\text{Par},VG}$	20 km/h
$v_{\text{Par},Stopp}$	0 km/h
$v_{\text{Par},max}$	150 km/h
v_0	0 km/h
$a_{x,\text{pos}}$	1,8 m/s ²
$a_{x,\text{neg}}$	2,0 m/s ²

systemerklärend, deterministisch, zeitinvariant sowie raumdiskret beschrieben werden (vgl. 3.1).

6.2.3 Exemplarische Verifikation des Modells

Um das Modell zu verifizieren [EAP.1](SWE.6, s. Abb. 4.4), wird im ersten Schritt eine synthetische Strecke von 2 km Länge herangezogen, die alle möglichen Szenarien enthält. Die einzelnen Szenarien sind dabei räumlich so weit voneinander entfernt, dass sie sich nicht gegenseitig beeinflussen. Dadurch ist es möglich, das Modell systematisch auf das Sollverhalten hin zu überprüfen. Erst danach folgt ein weiterer Verifikationsschritt mit Daten aus einem FOT als Referenz.

Im untersten Fenster von Abb. 6.5 sind in grau die berechneten Geschwindigkeitsconstraints dargestellt, die sich aus den Umgebungsgrößen (Fenster 1 bis 3 von oben) ergeben. Das Rechteckprofil zeigt den Geschwindigkeitsconstraint, der sich aus dem jeweils gültigem Tempolimit ergibt (nach Gleichung 6.7, inklusive einem Tempolimitwechsel markiert durch Punkt 3 in Abb. 6.5). Dieser Constraint wird durch stalaktitenförmige Constraints überlagert, die nach Gleichung 6.10 aus Kurven resultieren (siehe Punkt 1). Punkt 2 zeigt exemplarisch die Rückkehr (Beschleunigung) auf SG.

Zusätzlich enthält das Beispiel punktförmige Constraints zur Abbildung der Reaktion auf Stoppschilder⁹ (siehe Punkt 4), auf VG-Schilder¹⁰ (siehe Punkt 5) sowie auf Abbiegungen¹¹ (siehe Punkt 6).

Dadurch ergibt sich die Geschwindigkeitstrajektorie (als gestrichelte Linie), die jeweils vorausschauend und anhand der definierten, konstanten Beschleunigungen auf die vorausliegenden Constraints reagiert. Zu Annäherung an das Verhalten einer realen PCC wird der Algorithm 2 lediglich hinsichtlich der Beschleunigung adaptiert. Statt einer konstanten Beschleunigung wird zu Beginn die Beschleunigung in den ersten 2 s linear auf den Wert $a_{x,pos}$ hochgerampft. Analog wird die negative Beschleunigung in den letzten 2 s vor Erreichen einer temporären Konstantgeschwindigkeit linear vom Wert $a_{x,neg}$ heruntergerampft. Zusätzlich zu dieser synthetischen Route wird das Modell anhand von mehre-

⁹ nach Gleichung 6.9

¹⁰ nach Gleichung 6.8

¹¹ nach Gleichung 6.11

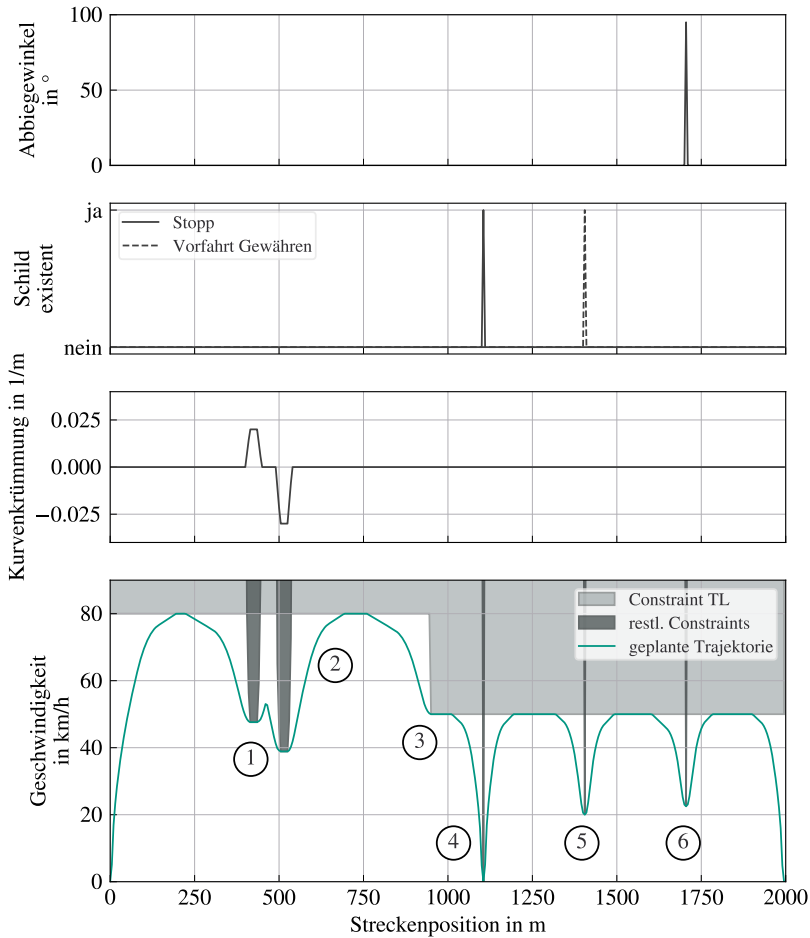


Abbildung 6.5: Simulation des geplanten Geschwindigkeitsverlaufs über der Strecke bei einer gegebenen, synthetischen Route. Die oberen drei Fenster zeigen die relevanten Umgebungsgrößen, aus denen die Constraints im vierten Fenster abgeleitet werden. Im vierten Fenster sind die resultierenden Szenarien markiert (1: Links-Rechts-Kurvenkombination, 2: Beschleunigung auf SG, 3: niedrigeres Tempolimit, 4: Stoppschild, 5: VG-Schild, 6: Abbiegung).

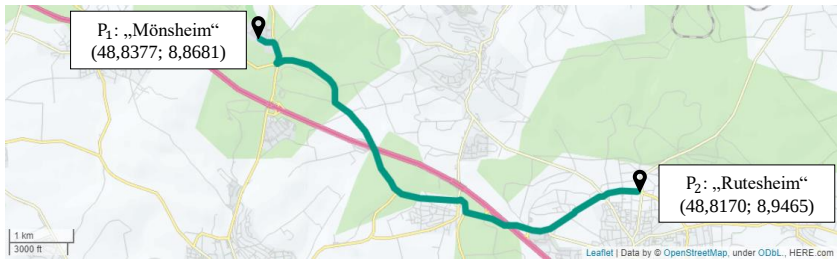


Abbildung 6.6: Route einer exemplarischen Referenzfahrt mit einer PCC zum Vergleich von Realfahrt und Simulation (von P_1 nach P_2)

ren realen Beispielen qualitativ verifiziert, indem die resultierende Geschwindigkeitstrajektorie auf Plausibilität relativ zu den Kartenattributen untersucht wird. Für den Fall, dass das SUT bereits als reales System im Fahrzeug getestet werden kann und somit eine Referenz zur Validierung vorliegt, kann das Modell auch empirisch überprüft und validiert werden. Dabei muss lediglich beachtet werden, dass mögliche Abweichungen zwischen realem Systemverhalten und dem Modellverhalten sowohl aus dem Modell des SUT als auch aus dem Umgebungsmodell (vgl. 6.3) resultieren können. Beim RVT-Framework kann das Umgebungsmodell prinzipbedingt durch veraltete oder fehlerhafte Kartenattribute (vgl. 2.6.2) in der Simulation vom Umgebungsmodell im Fahrzeug abweichen. Inwiefern dies einen Einfluss auf die Ergebnisse aufweist, wird im weiteren Verlauf dieses Abschnitts quantitativ untersucht.

Als exemplarische, reale Strecke wird die Route zwischen den Orten Mönsheim und Rutesheim (vgl. Abb. 6.6) mit einer Länge von 7,7 km verwendet. Auf dieser Strecke liegen aufgezeichnete Messdaten eines FOTs vor, bei dem ein in das Fahrzeug integrierter Entwicklungsstand einer PCC für die Fahrzeuglängsführung verwendet wird. Die im FOT aufgezeichnete Geschwindigkeitstrajektorie wird anhand der Streckenpositionen synchronisiert und mit der simulierten Geschwindigkeitstrajektorie (SIM) abgeglichen (s. Abb. 6.7). Dabei werden die in Tabelle 6.1 gelisteten Parameter so angepasst, dass sie der verwendeten Applikation des Realsystems (FOT) entsprechen. Die Constraints

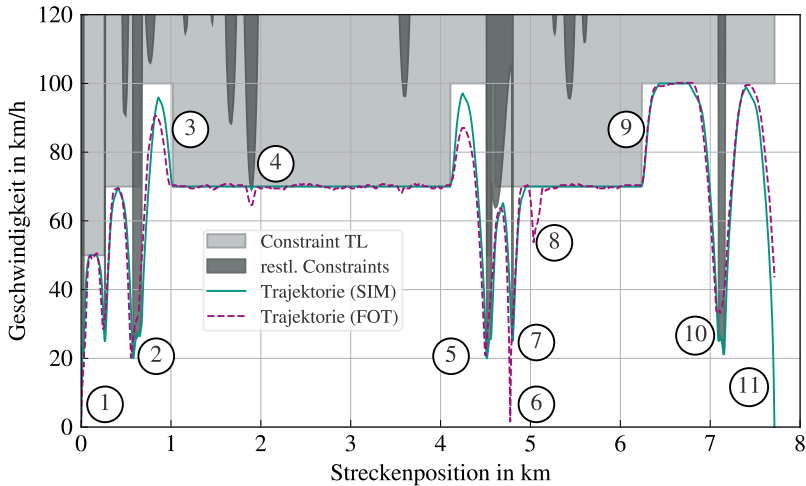


Abbildung 6.7: Vergleich der Geschwindigkeitstrajektorien einer Realfahrt (FOT) sowie einer virtuellen Testfahrt (SIM) jeweils mit einer PCC. Markierte Events: 1 bzw. 11: Start und Ende der SIM im Stillstand; 2, 5 und 10: Kreisverkehre; 3: niedrigeres Tempolimit; 4: Kurve; 6: LSA, in FOT muss der Fahrer spezifationsgemäß eingreifen und abbremsen (da außerhalb ODD); 7: Abbiegung; 8: kurzzeitig Folgefahrt in FOT; 9: Beschleunigung auf SG

ergeben sich aus den kartenbasierten Umgebungsgrößen entlang der Strecke. Zur Validierung der Simulation anhand der exemplarischen Route aus dem FOT sollen die in Abb. 6.7 markierten Punkte 1 bis 10 diskutiert werden. Wenn nicht explizit erwähnt, greift der Fahrer während des FOT nicht in die Längsführung ein und das Fahrzeug befindet sich in Freifahrt. Die grafische Gegenüberstellung zeigt, dass die simulierte Geschwindigkeitstrajektorie generell in weiten Teilen global dem Verlauf der realen Geschwindigkeitstrajektorie entspricht.

- Punkte 1, 11: Bei der Simulation wird die Fahrt im Stillstand begonnen und beendet (0 km/h). Im FOT liegt Fahrtanfang und -ende vor, bzw. nach dem vorliegenden Ausschnitt, was die Abweichungen begründet.
- Punkte 2, 5, 10: Hier liegen Kreisverkehre, die auch in der Karte (Abb. 6.6) sichtbar sind. Bei der Einfahrt in die ersten beiden Kreisverkehre liegt eine weitgehende Übereinstimmung zwischen FOT und SIM vor (< 2 km/h Geschwindigkeitsdifferenz). Bei der Ausfahrt scheint das System im FOT deutlich dynamischer zu sein (ca. $+6$ km/h). Im dritten Kreisverkehr ist das FOT sowohl beim Eingang als auch beim Ausgang etwa 8 km/h schneller.
- Punkt 3: Die prädiktive Reaktion auf das niedrigere Tempolimit findet beim FOT etwas früher statt (ca. 40 m). Dies wird auf eine Ungenauigkeit der Kartendaten zurückgeführt.
- Punkt 4: Die Kurve wird im FOT etwas langsamer durchfahren als in der Simulation (Abweichung: $-4,4$ km/h).
- Punkt 6: Hier greift der Fahrer beim FOT ein, um an der LSA (Ampel) zu bremsen, da diese Szenarien außerhalb der ODD liegen. In der Simulation bleiben LSAs unberücksichtigt, was die Abweichung erklärt.
- Punkt 7: In Verbindung mit der Ampel tritt hier eine Abbiegung auf, wofür in der Simulation entsprechend verzögert wird.
- Punkt 8: Im FOT folgt das Fahrzeug einem vorausfahrenden, langsameren Fahrzeug.
- Punkt 9: Es erfolgt die Beschleunigung auf die neue SG.

Zusammenfassend wird festgehalten, dass die Simulation das reale System qualitativ abbildet, das heißt, es reagiert auf dieselben Szenarien. Somit wird [Req16] als erfüllt betrachtet. Hinsichtlich der [Req17] ist eine quantitative

Betrachtung notwendig. Daher wird die Analyse auf zusätzliche Fahrten erweitert, um eine statistische Auswertung mit einer größeren Zahl an Szenarien zu ermöglichen.

Für die Analyse werden aufgezeichnete Erprobungsdaten über eine Strecke von 318 km aus dem öffentlichen Straßenverkehr aus dem Jahr 2019 verwendet und die Abschnitte herausgefiltert, in denen sich das Ego-Fahrzeug im FOT in Folgefahrt befand oder der Fahrer in die Längsführung eingegriffen hat. Aus den verbleibenden Streckendaten werden 91 bewertbare, konkrete Szenarien extrahiert, die sich aus 36 Kurven, 20 Abbiegungen, 29 Tempolimitwechseln sowie 6 VG-Szenarien zusammensetzen. Vom Typ „Stoppchild“ sind in dem vorliegenden Datensatz keine bewertbaren Szenarien vorhanden. Es wird jedoch angenommen, dass die Ergebnisse der VG-Szenarien übertragen werden können, da diese Szenarien strukturell gleich sind. Für jedes der

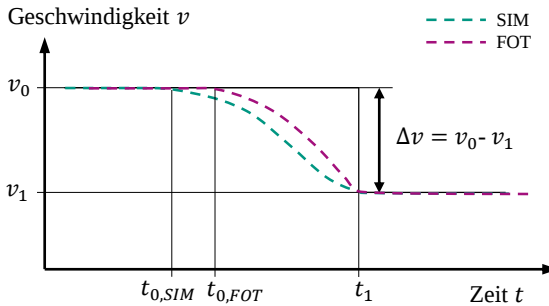


Abbildung 6.8: Exemplarisches Szenario, bei dem das Fahrzeug von der Ausgangsgeschwindigkeit v_0 auf die Szenariozielgeschwindigkeit v_1 innerhalb der Zeit $\Delta t = t_1 - t_0$ verzögert, wobei eine Abweichung der Geschwindigkeitsverläufe zwischen SIM und FOT auftritt.

konkreten Szenarien wird der Zeitpunkt t_0 des Beginns der Verzögerung sowie der Zeitpunkt t_1 des Erreichens der Szenariozielgeschwindigkeit v_1 ermittelt (s. Abb. 6.8). Daraus leiten sich zwei Zeitdauern $\Delta t_{SIM} = t_{1,SIM} - t_{0,SIM}$ sowie

$\Delta t_{FOT} = t_{1,FOT} - t_{0,FOT}$ ab. Die absolute Abweichung beider Zeitdauern ist durch

$$\Delta t_{SIM-FOT,abs} = \Delta t_{SIM} - \Delta t_{FOT} \quad (6.13)$$

gegeben und die relative Abweichung durch

$$\Delta t_{SIM-FOT,rel} = (\Delta t_{SIM} - \Delta t_{FOT}) / \Delta t_{FOT}. \quad (6.14)$$

Die relative und absolute Abweichung zwischen der Zeitdauer von virtueller

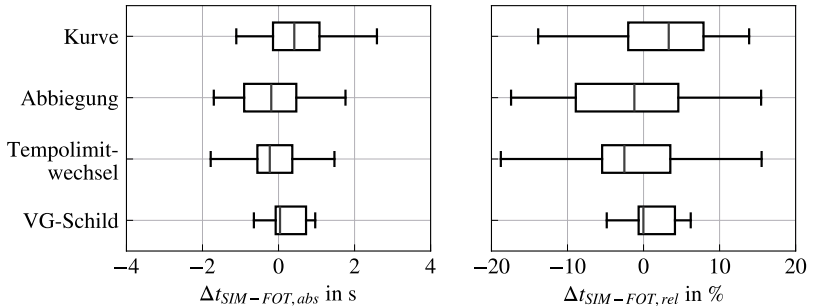


Abbildung 6.9: Box-Plot mit der absoluten und relativen Abweichung der Szenariozielgeschwindigkeit zwischen (SIM) und Realfahrt (FOT) für die funktionalen Szenarien Kurve, Abbiegung Tempolimitwechsel und VG-Schild.

sowie realer Testfahrt für ein Szenario auf derselben Route wird für die oben aufgeführten, funktionalen Szenarien berechnet. Da der Mittelwert der Abweichungen gegen Null strebt (s. Abb. 6.9), wird davon ausgegangen, dass kein systematischer Fehler in der Simulation vorliegt. Eine Streuung kann beobachtet werden, die hier aber akzeptiert werden kann, da einzelne Szenarien nicht Ziel der Untersuchung sind, sondern lediglich auf höherer Ebene aggregierte Statistiken relevant sind.

Da während der Realfahrt die Umgebungsrepräsentation als Fusion von Karteninformation und Onboardsensorik entsteht, liegt es nahe, dass das Rauschen

zumindest partiell aus dem Einfluss der Onboardsensorik hervorgeht, da diese Quelle konzeptbedingt nicht in die Simulation eingeht.

Entsprechend dem Vorgehen zur Entwicklung der Simulationsmodelle (vgl. 4.5.2) wird das Modell als ausreichend genau für den Anwendungsfall (vgl. [Req16], [Req17]) betrachtet und somit verwendet¹². Eine zusätzliche Validierung folgt in Abschnitt 6.5.

6.3 Wahl von Parametern und Ausführung des RVT-Frameworks zur PCC-Auslegung

Nach erfolgreicher Implementierung, Verifikation sowie Validierung aller Bestandteile des Frameworks ([EAP.1] in Abb. 4.3) wird die PCC-Funktion anhand des RVT-Frameworks untersucht. Für den definierten Anwendungsfall (vgl. 6.1) wird das RVT-Framework gemäß [EAP.2] (s. Abb. 4.3) konfiguriert und nach [EAP.3] ausgeführt. Bei der Konfiguration kommen die Parameter nach Abschnitt A.3 zum Einsatz.

Nach der Konfiguration des RVT-Frameworks werden alle Schritte im Framework automatisiert durchlaufen. Dabei werden insgesamt 18.871 virtuelle Testfahrten mit dem im Abschnitt 6.2 entwickelten Modell entlang von repräsentativen, virtuellen Routen durchgeführt, die in der Kartenansicht in Abb. 6.10 gezeigt sind. Die Zeit zur Durchführung der Simulationen beträgt 5 Stunden und 47 Minuten. Eine Übersicht über die Länderverteilung der virtuellen Teststrecke findet sich im Anhang (s. Abb. A.8).

Nach Durchlaufen der Simulation liegen die Ergebnisse der RVT als raumzeitliche Serien vor (vgl. [F3] in Abb. 6.11) und müssen im nächsten Schritt analysiert werden. Zur Berechnung der gewünschten Metriken werden Merkmale aus jeder Einzelfahrt extrahiert (vgl. [F4] und [F5] in Abb. 6.11), die in der Datenbank zwischengespeichert werden und im Anschluss über alle Fahr-

¹² Neben der Betrachtung der Szenariozeiten t_0 und t_1 kann für andere Anwendungsfälle auch die Szenariozielgeschwindigkeit v_1 von Interesse sein. Daher wird zusätzlich für die funktionalen Szenarien Kurve, Abbiegung und VG-Schild ein Vergleich von v_1 zwischen SIM und FOT vorgenommen (s. Abb. A.7)

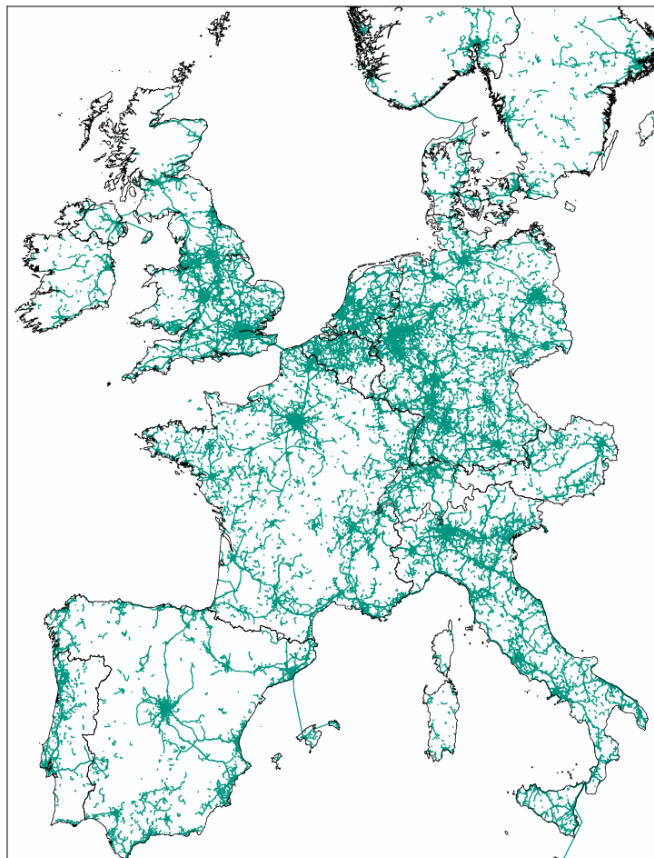


Abbildung 6.10: Karte mit gefahrenen Routen der virtuellen Testfahrten in Westeuropa

ten aggregiert werden können (vgl. [F6], [F7] und [F8] in Abb. 6.11). Dabei wird jede Einzelfahrt als Sequenz von Szenarien aufgefasst, die zusammen mit Metainformationen extrahiert werden und in einer Szenariotabelle abgespeichert werden. Zur Bestimmung der Übernahmehäufigkeit I_{PCC} werden zudem noch die Szenen erfasst, in denen eine Übernahme seitens des Fahrers notwendig wird. Anhand der verwendeten Verifikationsdaten (vgl. 6.2.3) werden die

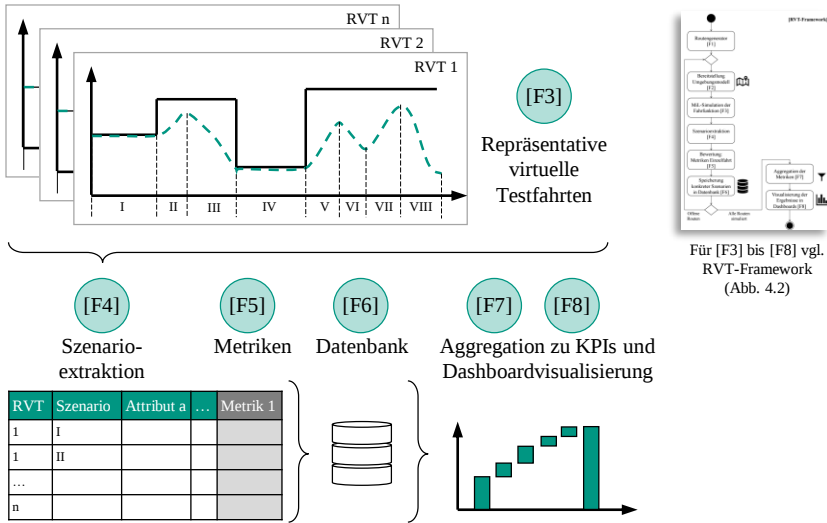


Abbildung 6.11: Vorgehen zur Extraktion und Aggregation von Szenarien aus mehreren virtuellen Testfahrten

funktionalen Szenarien identifiziert, in denen eine Übernahme der Längsführung durch den Fahrer notwendig wurde. Dieses Set wird durch logische Überlegungen sowie Erfahrungen aus dem Erprobungsbetrieb ergänzt und anschließend relativ zu den PEGASUS-Szenarioebenen eingeordnet (s. Abb. 6.12). Anhand der PEGASUS-Ebenen werden die Eigenschaften charakterisiert, die dazu führen, dass das jeweilige Szenario außerhalb der ODD liegt.

Zusätzlich werden die Szenarien in zwei Kategorien unterteilt, die den Grund für die erforderliche Fahrerübernahme beschreiben. Die gestrichelt umrahmten Kästchen beschreiben Szenarien, in denen besondere Straßenverhältnisse dazu führen, dass eine niedrigere Fahrzeuglängsgeschwindigkeit gewählt werden muss, als durch das gültige Tempolimit sowie die Kurvenkrümmung berechnet werden kann. Diese Szenarien sind oft ortsungebunden und können im vorliegenden Beispiel mit der RVT nicht simuliert werden, da die Kartendatenbank keine Informationen darüber bereithält. Die daraus resultierenden notwendigen

6.3 Wahl von Parametern und Ausführung des RVT-Frameworks zur PCC-Auslegung

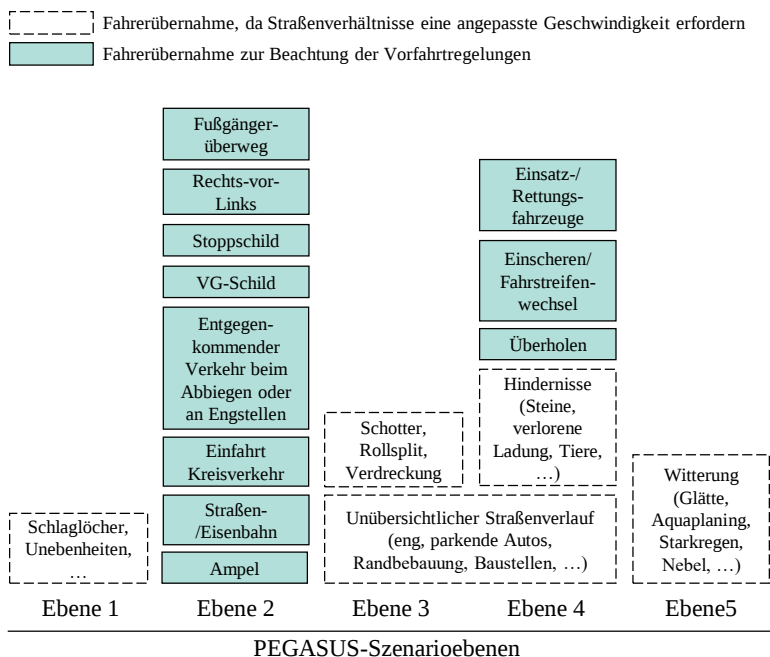


Abbildung 6.12: PCC Fahrerübernahmeszenarien mit Einordnung in das PEGASUS Ebenenmodell. Bei der Fahrerübernahme wird unterschieden zwischen zwei Kategorien unterschieden: Szenarien, die wegen der Straßenverhältnisse eine adaptierte Geschwindigkeit erfordern (gestrichelte Kästchen) und solchen Szenarien, die aufgrund von Vorfahrtregelungen existieren (grün hinterlegte Kästchen).

Fahrerübernahmen müssen auf anderem Wege geschätzt werden oder bleiben unberücksichtigt.

Die zweite Szenariokategorie beschreibt potenzielle Vorfahrtsituationen, die aus dem Zusammenspiel der Straßentopologie sowie der Präsenz anderer Verkehrsteilnehmer entsteht (Kästchen mit grünem Hintergrund in Abb. 6.12). Diese Szenarien können im Rahmen der RVT zumindest hinsichtlich der Straßentopologie identifiziert werden, aber aufgrund der fehlenden Verkehrssimu-

lation ist keine Aussage darüber möglich, ob beispielsweise bei der Einfahrt in den Kreisverkehr einem Fahrzeug Vorfahrt gewährt werden muss, oder nicht. Ebenso ist es in der RVT auch nicht möglich, einen für die Realwelt repräsentativen Ampelstatus zu simulieren. Daher werden alle Szenarien der PEGASUS-Ebene 2 als konkrete Szenarien aus den virtuellen Testfahrten extrahiert, sodass zumindest der Grenzfall analysiert werden kann und eine Grundlage für eine Abschätzung möglich ist.

6.4 Ergebnisse der PCC-Analyse

Nach vollständigem Durchlauf des RVT-Frameworks ([EAP.3] in Abb. 4.3) für den vorliegenden Anwendungsfall der PCC-Analyse folgt die Ergebnisanalyse [EAP.4]. Der SE verwendet die interaktiven Dashboards (aus [F8], Abb. 4.2), um die für ihn relevanten Fragestellungen bei der Auslegung der PCC zu beantworten. Basierend auf den Ergebnissen entscheidet der SE, ob ein erneuter Durchlauf des Frameworks ([EAP.2], [EAP.3] und [EAP.4]) mit verändertem Parametersatz notwendig ist (siehe Schleife in Abb. 4.3).

6.4.1 Evaluierungsmetrik Verfügbarkeit

Anhand der extrahierten Szenarien kann eine Aussage über die Fahrfunktionsverfügbarkeit getroffen und somit die ODD quantifiziert werden (vgl. Balken in Abb. 6.1). Dazu wird für jedes funktionale Szenario die Verfügbarkeit bestimmt (vgl. 6.1) und entspricht dabei dem Fahrzeitanteil der Gesamtzeit.

Ohne prädiktive Funktionsfeatures ergibt sich eine Verfügbarkeit von 74,4% der Zeit, die sich aus den beiden ACC/GRA Features „SG Halten“ sowie „Beschleunigung auf SG“ zusammensetzt (siehe erster Balken von links mit Schraffierung in Abb. 6.13). Wird prädiktiv auf Abbiegungen geregelt, ergibt sich in Westeuropa eine Vergrößerung der ODD und somit eine Erhöhung der Verfügbarkeit um 6,7%P der Fahrtzeit. Eine Kurvenregelung erhöht um weitere 6,3%P. Alleine mit diesen beiden prädiktiven Features wird also bereits eine

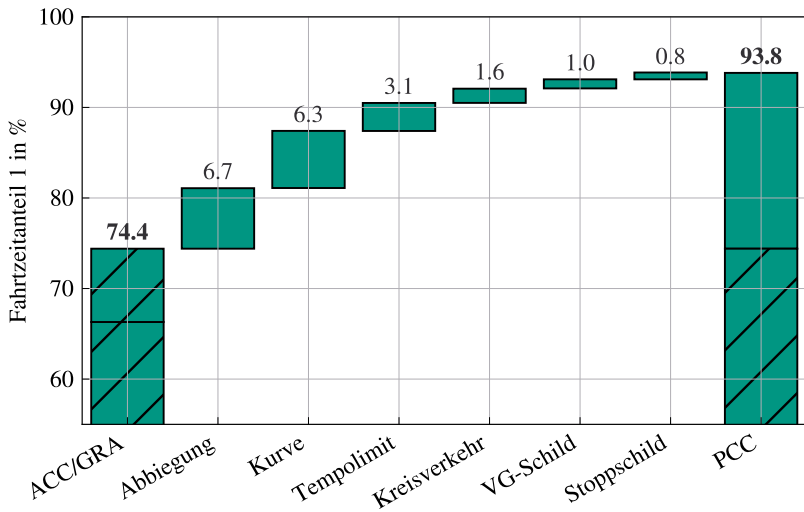


Abbildung 6.13: Ermittelte Fahrzeitanteile der assistierten Längsführung in den simulierten Fahrten je nach Feature-Set der PCC, die eine Ableitung der Metriken Verfügbarkeit V_{PCC} sowie Erlebbarkeit E_{PCC} erlauben. Der ganz rechte Balken zeigt die zeitmäßige Verfügbarkeit der PCC-Funktion bestehend aus den sechs Features links daneben. Abprungbasis ist die ACC/GRA-Funktion.

zeitmäßige Verfügbarkeit von etwa 87% erreicht.

Durch zusätzliche prädiktive Regelungen auf Tempolimitänderungen, auf Kreisverkehre, sowie ein vorausschauendes Abbremsen vor VG- sowie Stoppschildern wird die Gesamtverfügbarkeit der PCC im Modus Freifahrt auf $V_{PCC} = 93,8\%$ erhöht. Ohne diese Features müsste der Fahrer bei jedem der Szenarien eingreifen und solange manuell die Geschwindigkeit regeln, bis wieder eine konstante SG angemessen ist.

6.4.2 Evaluierungsmetrik Erlebbarkeit

Die Erlebbarkeit E_{PCC} beschreibt den Mehrwert der PCC gegenüber dem ACC (vgl. 6.2). Durch Abziehen der Fahrtanteile von ACC/GRA (schraffierte Bereiche in Abb. 6.13) repräsentieren die verbleibenden Balken die Erlebbarkeit. In Westeuropa ergibt sich in Summe für die sechs ausgewählten PCC-Szenarien eine zeitliche Erlebbarkeit von 19,4% (siehe rechter Balken, abzüglich schraffiertem Rumpf).

Die ermittelten Werte sind als theoretische Maximalwerte zu verstehen, die dann erreicht werden, wenn sich das Ego-Fahrzeug während der gesamten Fahrt in Freifahrt befindet. Befindet sich beispielsweise während einer Kurvendurchfahrt ein langsames Zielobjekt vor dem Ego-Fahrzeug, so greift in dem Moment die ACC-Regelung, sodass sich die PCC-Erlebbarkeit reduziert.

Auch wenn diese Zahlen für E_{PCC} nicht hoch erscheinen, so führen die oft kürzeren zeitlichen Abschnitte, in denen die PCC erlebbar ist, dazu, dass längere ACC/GRA-Abschnitte miteinander verbunden werden, sodass die Längsführung ohne Unterbrechung gegeben ist und kein Fahrereingriff notwendig wird. Wie oft diese Fahrereingriffe dann noch erforderlich sind, wird durch die Übernahmehäufigkeit quantifiziert.

6.4.3 Evaluierungsmetrik Übernahmehäufigkeit

Die dritte Evaluierungsmetrik ist die Häufigkeit notwendiger Übernahmen durch den Fahrer. Der Fahrer muss immer dann eingreifen, wenn das System die Längsführung nicht (vollständig) übernehmen kann (vgl. 6.2). Dabei werden zwei Ereignisarten unterschieden (vgl. Abb. 6.14):

1. Linkes Balkendiagramm: Prädiktive Szenarien, die in der Simulation bereits umgesetzt sind. Hier verhält sich das System so, dass der Fahrer nicht eingreifen muss, indem es Straßengeometrie und Tempolimit berücksichtigt. An VG- und Stoppschildern wird die Geschwindigkeit reduziert (vgl. 6.2.2). Die Abbildung zeigt, wie viele zusätzliche Fahrer-

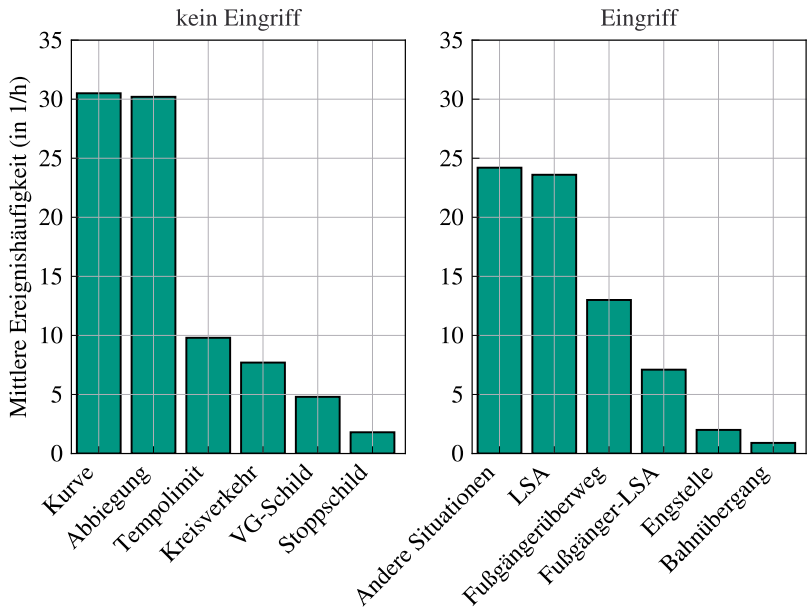


Abbildung 6.14: Auftretenshäufigkeit potenziell notwendiger Übernahmen der Längsführung durch den Fahrer in den simulierten Fahrten. Auf der rechten Seite sind zusätzlich potenzielle VG-Situationen aufgelistet, die ein Eingreifen des Fahrers erfordern, sofern ein entsprechender Verkehr herrscht oder die LSA *rot* zeigt. Die „Anderen Situationen“ sind alle übrigen Situationen, in denen das Ego-Fahrzeug Vorfahrt gewähren muss und die nicht in den anderen Balken aufgelistet sind.

eingriffe notwendig wären, wenn diese Szenarien nicht im SUT enthalten wären.

2. Rechtes Balkendiagramm: Potenzielle VG-Szenarien, an denen der Fahrer eingreifen muss, sofern ein entsprechendes Verkehrsszenario vorliegt. Diese Szenarien sind aus den Fahrerübernahmeszenarien nach PE-GASUS (s. Abb. 6.12) abgeleitet. Unter „Andere Situationen“ sind alle übrigen Situationen zusammengefasst, in denen das Ego-Fahrzeug

Vorfahrt gewähren muss, sofern Verkehr vorhanden ist, z.B. Rechts-vor-Links oder entgegenkommender Verkehr beim Linksabbiegen.

Werden aus beiden Diagrammen alle Situationen addiert, in denen potentiell Vorfahrtsverkehr auftreten kann, ergibt sich im Grenzfall eine Übernahmehäufigkeit von maximal 92,6 1/h. Dies beinhaltet auch die LSA, die nicht immer rot anzeigen. Im Falle einer Fahrerübernahme muss der Fahrer in der Regel das Fahrzeug abbremsen, um einem anderen Verkehrsteilnehmer Vorfahrt zu gewähren oder dem Rotlicht einer LSA Folge zu leisten. Danach kann der Fahrer das System wieder aktivieren, welches dann wieder auf die SG zurückkehrt. Durch eine Abschätzung, wie oft an den aufgelisteten Szenarien tatsächlich Verkehr vorliegt, kann der obige Maximalwert sinnvoll skaliert werden. Zusätzlich ermöglicht der Maximalwert einen relativen Vergleich der Übernahmehäufigkeit abhängig von weiteren Attributen, wie z.B. dem Land.

6.4.4 Regionsabhängige Auswertung der PCC-Metriken

Für die analysierte Region Westeuropa wird eine mittlere Erlebbarkeit von $E_{PCC,WEU} = 19,4\%$ ermittelt (vgl. 6.4.2). Mit der These, dass sich Unterschiede zwischen den Ländern im Straßennetz, in der Straßenverkehrsordnung sowie in der Topografie auch auf die Metriken der Fahrfunktion auswirken, soll exemplarisch die Erlebbarkeit pro Land berechnet werden. Dazu werden die Fahrzeitanteile der für die PCC relevanten Szenarien auf Länderebene aggregiert und auf die Gesamtfahrzeit im jeweiligen Land normiert.

Die Ergebnisse der Analyse unterstützen die obige These, da die Erlebbarkeit länderabhängig zwischen $E_{PCC,NOR} = 13,7\%$ in Norwegen und $E_{PCC,PRT} = 25,2\%$ in Portugal schwankt (s. Abb. 6.15). Folgende Beobachtungen werden gemacht:

1. Es gibt eine Varianz der Erlebbarkeit zwischen den betrachteten Ländern.

- Es lassen sich Gruppen von benachbarten Ländern identifizieren mit ähnlichen Ausprägungen, z.B. ITA, FRA, CHE, AUT als eine Gruppe mit einer hohen Erlebbarkeit ($E_{PCC} > 21\%$) sowie eine Gruppe SWE, FIN, NOR, DNK mit einer niedrigen Erlebbarkeit ($E_{PCC} \approx 15\%$).
- Die Anteile der einzelnen PCC-Features variieren je nach Land. In Irland wird knapp ein Viertel der Erlebbarkeit durch Kreisverkehre verursacht ($4,1\%P$). In Finnland hingegen tragen Kreisverkehre kaum zur Erlebbarkeit bei ($0,2\%P$). Auch die Regelzeit auf Stoppschilder ist mit $\leq 0,21\%P$ in manchen Ländern unterrepräsentiert (GBR, NLD, CHE, FIN, NOR, DNK und IRL).

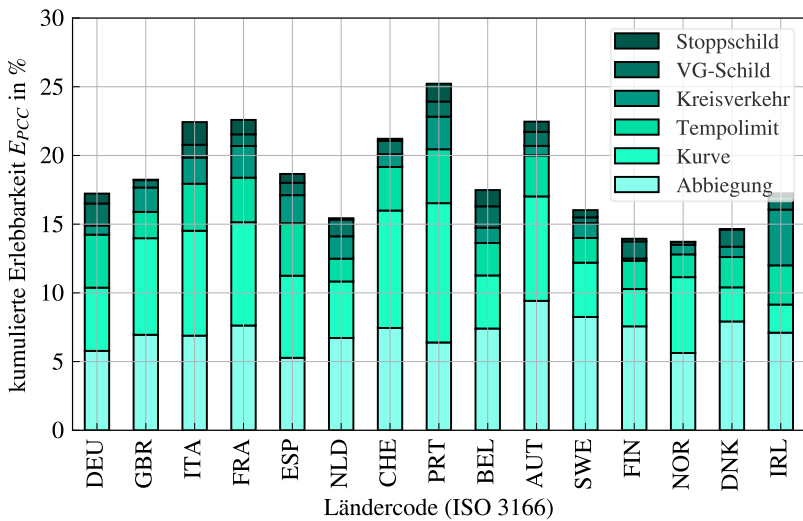


Abbildung 6.15: Erlebbarkeit E_{PCC} der in der virtuellen Testfahrt simulierten PCC in Westeuropa pro Land

Die zweite Beobachtung legt nahe, dass es räumliche Korrelationen zwischen benachbarten Ländern hinsichtlich der betrachteten Metriken geben könnte.

Daher wird in einem nächsten Schritt eine niedrigere Aggregationsebene gewählt (Bundesland statt Land)¹³. In jeder dieser Regionen wird die mittlere Erlebbarkeit $E_{PCC,Region}$ berechnet und zwecks Darstellbarkeit auf einer Karte in fünf Quantile eingeteilt (s. Abb. 6.16). Anhand der räumlichen Darstellung auf der Karte können Beziehungen zwischen benachbarten Regionen betrachtet werden. Folgende Beobachtungen resultieren aus der Kartendarstellung:

1. 60% der Regionen liegen im schmalen Band von 14 bis 25% Erlebbarkeit.
2. Ländergrenzen geben keine scharfe Abgrenzung der Erlebbarkeitsklassen vor (Beispiel für gleiche Klassen über Ländergrenzen hinweg: FRA - BEL, BEL - NLD, während sich innerhalb von BEL die Klasse ändert).

Diese qualitativen Beobachtungen motivieren eine quantitative Untersuchung, mit der Frage, ob die untersuchte Metrik Erlebbarkeit räumlich korreliert. Dazu wird die Methode der räumlichen Autokorrelation herangezogen, welche die Beziehung der Ausprägungen einer Variablen an verschiedenen Orten analysiert [75]. Eine positive räumliche Autokorrelation bedeutet, dass sich zwei räumlich nahe beieinander liegende Beobachtungen ähneln. Dies entspricht Toblers „Erstem Gesetz der Geografie“, das besagt, dass alles miteinander verwandt ist, aber nahe Dinge mehr als ferne Dinge¹⁴ [113].

Als Maß für die räumliche Autokorrelation werde der von Patrick Moran entwickelte Kennwert I [67]

$$I = \frac{n}{\sum_i^n \sum_j^n w_{ij}} \frac{\sum_i^n \sum_j^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6.15)$$

¹³ Nicht in allen betrachteten Ländern gibt es ein Äquivalent auf administrativer Ebene, das dem Bundesland in Deutschland entspricht. Ist die nächstkleinere administrative Ebene in einem Land zu fein aufgelöst, sodass pro Region teilweise keine Datenpunkte mehr vorliegen, wird stattdessen die Länderebene beibehalten (GBR, LUX, CHE).

¹⁴ Originaler Wortlaut im Englischen: „Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things.“ [113]

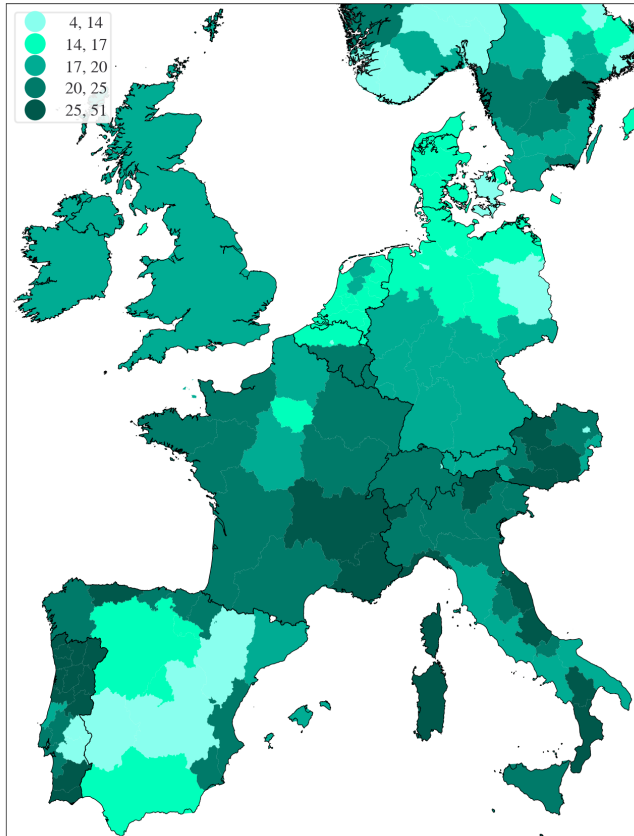


Abbildung 6.16: Quantile der Erlebbbarkeit E_{PCC} der in der virtuellen Testfahrt simulierten PCC in Westeuropa pro Region

herangezogen. Dabei stehen die Zählvariablen i und j für zwei der insgesamt n Regionen. x_i sei die Ausprägung der Variable in der Region i und $\bar{x}$ der Mittelwert der Ausprägungen in allen Regionen. Die Distanzmatrix w_{ij} repräsentiert die Nähe (im Sinne des Nachbarschaftsverhältnisses) zwischen zwei Regionen

i und j als Gewichtsmatrix. Für die Bestimmung der Distanzmatrix existieren verschiedene Vorgehensweisen [40][13], unter anderem:

- Euklidischer Abstand (z.B. zwischen den Mittelpunkten der beiden Regionen)
- Manhattan-Metrik
- Vorliegen gemeinsamer Kanten
- k nächstgelegene Nachbarn (KNN)¹⁵.

Bei den ersten beiden Ansätzen können die Gewichte beispielsweise über den inversen Abstand dargestellt werden. Je näher zwei Regionen geografisch sind, desto höher wird ihre Beziehung gewichtet. Bei den letzten beiden Ansätzen werden die Gewichte zu 0, bzw. 1 gesetzt, je nachdem, ob das Kriterium für die Kombination der zwei Regionen i und j erfüllt ist. Im vorliegenden Anwendungsfall wird die Nächste-Nachbarn-Klassifikation gewählt, da eine pauschale Festlegung von Distanzen schwierig ist, wenn die Regionen erhebliche Größenunterschiede aufweisen.

Um den Parameter k_{KNN} als Anzahl der betrachteten nächsten Nachbarn für die Bestimmung der Distanzmatrix festzulegen, wird untersucht, wie viele direkte Nachbarn¹⁶ n_{dN} jede Region hat. Im vorliegenden Fall beträgt der Median $\tilde{n}_{dN} = 4$, was als Anhaltswert für die Größenordnung der Anzahl direkter Nachbarn dienen soll. Ausgehend davon wird auch $k_{KNN} = 4$ gewählt, sodass sich für die Metrik Erlebbarkeit in Westeuropa ein Kennwert $I = 0,381$ (vgl. Gleichung 6.15) ergibt¹⁷. Der p-Wert $p_{sim} = 0,001$ bestätigt statistische Signifikanz, sodass die Nullhypothese verworfen werden kann. Die Nullhypothese besagt, dass die Ausprägungen der betrachteten Variable zufällig im Raum

¹⁵ Englisch: K-Nearest-Neighbors (KNN)

¹⁶ Direkte Nachbarn bedeutet, dass sich beide Regionen eine gemeinsam Kante teilen.

¹⁷ Die praktische Umsetzung der Analyse der räumlichen Autokorrelation erfolgt unter Anwendung der Python-Bibliothek Pysal [85]

verteilt sind [40]. Somit ist die Ausprägung der Erlebbarkeit nicht zufällig geografisch verteilt, sondern es kann entsprechend des ermittelten I-Werts von einer positiven räumlichen Autokorrelation gesprochen werden. Das bedeutet, dass es wahrscheinlicher ist, dass ähnliche Ausprägungen der Erlebbarkeit nahe beieinander liegen. Folglich ist die eingangs formulierte Vermutung anhand der grafischen Kartendarstellung von Quantilen nun auch statistisch und quantitativ bestätigt.

6.5 Diskussion und Interpretation der Ergebnisse sowie Limitierungen

Der in diesem Kapitel herangezogene Anwendungsfall zeigt exemplarisch, dass das RVT-Framework trotz der Limitierungen das Untersuchungsziel erfüllt. Die Limitierungen werden durch Vereinfachungen während der Modellbildung (vgl. 6.2.2) sowie prinzipbedingt durch die reduzierte Umfeldinformation in den Kartendaten induziert. Diese Vereinfachungen erlauben es, dass die prädiktiven Features gezielt isoliert betrachtet und bewertet werden können. Der Verifikations- und der Validierungsschritt (vgl. 6.2.3) zeigen, dass die gesamte Simulationskette dem Nutzungszweck (vgl. 6.1) gerecht wird. Erstmals ist eine skalierbare und zugleich repräsentative Aussage bei der Untersuchung von Fahrfunktionen anhand von virtuellen Testfahrten möglich.

Dadurch, dass nur die für prädiktive Funktionen wichtigsten Umfeldgrößen betrachtet werden, bleiben die Umfeldgrößen auf den PEGASUS-Ebenen 1, 3 sowie 5 unberücksichtigt. Zukünftig könnten noch weitere Datenquellen, wie bspw. empirische Daten aus der Kundenflotte, herangezogen werden, um Abschätzungen zum Einfluss der genannten PEGASUS-Ebenen vorzunehmen. Die RVT stellt im vorliegenden Anwendungsfall somit eine notwendige Ergänzung zum FOT dar, die eine Reduktion des Validierungsumfangs im realen

Straßenverkehr ermöglicht¹⁸. Der hier gewählte Anwendungsfall dient primär als Nachweis der prototypischen Umsetzbarkeit. Daher wird z.B. bei der Modellbildung der Trajektorienplanung auch darauf verzichtet, einen Vergleich zwischen unterschiedlichen Abstraktionsgraden durchzuführen, mit dem Potenzial, den optimalen Kompromiss zwischen Genauigkeit des Modells und Rechenaufwand sowie Implementierungsaufwand zu finden. Es gilt vielmehr zu beweisen, dass generell eine skalierbare Simulation möglich ist (vgl. 6.2.1), was mit dem vereinfachten Modell gegeben ist.

Für Anwendungen mit höheren Anforderungen an die Genauigkeit der Trajektorienberechnung ist es denkbar, eventuelle Unsicherheiten in den Eingangsdaten modellbasiert zu berücksichtigen, sodass die Ergebnisse mit einer Fehler-toleranz versehen werden können. Anhand der Toleranzinformation wird dann die Nutzbarkeit der Ergebnisse bewertet, bzw. die Ergebnisse entsprechend interpretiert.

Am Beispiel der PCC wurde erfolgreich die ODD einer prädiktiven Fahrfunktion quantifiziert, indem die Evaluierungsmetrik *Verfügbarkeit* auf die extrahierten Szenarien der RVT angewendet wurde (vgl. 6.4.1). Damit wird auch FF3 (vgl. 1.2) beantwortet. Die Ergebnisse werden für jedes Funktionsfeature separat bestimmt, sodass der Mehrwert dieser Features nun beziffert werden kann. Zusätzlich wird exemplarisch eine regionsbezogene Auswertung durchgeführt um die Abhängigkeit von geografischen Faktoren aufzuzeigen.

Durch die Anwendung der in dieser Arbeit entwickelten RVT sind zu erwartende regionale Unterschiede bei der Nutzung von Fahrfunktionen erstmals quantifizierbar, ohne dass eine dedizierte und kostenintensive Datenerhebung, z.B. durch physische Testaktivitäten (FOT), notwendig ist. Bezogen auf die PCC ergibt sich im Mittel so eine Verfügbarkeit $V_{PCC} = 93,8\%$ der gefahrenen Strecke.

Außerhalb der ODD liegen:

¹⁸ Die Quantifizierung der möglichen Reduktion des Validierungsumfangs liegt außerhalb des Umfangs dieser Dissertation. Es wird auf vertiefende Literatur verwiesen [5].

- Streckenabschnitte, die im Umfeldmodell ein Tempolimit unter 30 km/h aufweisen
- Abschnitte am Ende jeder simulierten Fahrt, in denen nicht automatisiert in den Stillstand abgebremst wird

Für die gesamte Analyse der PCC wird der Modus *Freifahrt* angenommen, um gezielt die prädiktiven Features separat zu betrachten (vgl. 6.2.2). In der Realität wird zu einem Teil der gefahrenen Strecke *Folgefahrt* vorliegen. Es wird bei der virtuellen Testfahrt lediglich angenommen, dass die für den ACC relevanten Szenarien nicht auftreten. Würden diese Szenarien auftreten, so lägen sie zeitlich parallel zu den bereits betrachteten PCC-Szenarien, es ändert sich in dem Moment nur der Regelungsgrund. Die oben genannte Verfügbarkeit der PCC bleibt aber erhalten, da die PCC auch die ACC-Features enthält (vgl. 6.1). Im Rahmen der Konzeptentwicklung für die RVT (vgl. 4.6) konnte noch nicht überprüft werden, ob alle Anforderungen erfüllt sind, da einige Anforderungen ([Req10], [Req12]) vom Umgebungsmodell und dem Modell des SUT abhängen. Im vorliegenden Fall der PCC wird nicht die gesamte Wirkkette abgebildet (s. Abb. 6.3). Die Onboard-Sensorik sowie die Aktorik wird in der Modellierung nicht berücksichtigt. Sofern jedoch entsprechende Modelle vorhanden sind, können diese eingebunden werden, um auch die Anforderung nach der Abbildung der kompletten Wirkkette (vgl. [Req10]) zu erfüllen. Je nach Anforderungen an die Rechenleistung kann es dadurch zu einer höheren Simulationsdauer kommen.

Ebenso das Abbilden subjektiver Eindrücke (vgl. [Req12]) ist für die PCC nicht möglich anhand der RVT. An der Stelle wäre ein Fahrermodell notwendig, welches für jede simulierte Strecke eine subjektive Bewertung der gefahrenen Geschwindigkeit vornehmen könnte. Auch wenn nicht alle neuen Anforderungen (vgl. 4.2.2) erfüllt sind, so liefert die RVT durch die nachgewiesene Repräsentativität ([Req9]) einen Vorteil gegenüber der konventionellen virtuellen Testfahrt.

6.6 Integration der Validierung anhand der RVT in den etablierten Produktentwicklungsprozesses

Unter Verwendung der ermittelten und aufbereiteten Metriken werden im Rahmen des Produktentwicklungsprozesses datengetrieben Entscheidungen gefällt. Dazu werden die in der Szenario-Datenbank abgelegten Szenarien je nach Fragestellung unterschiedlich ausgewertet. Für das Beispiel der PCC wird gezeigt, wie die Ergebnisse der RVT in den etablierten Entwicklungsprozess einfließen.

Während der *Produktplanungsphase* (s. Abb. 2.6) wird die Feature-Planung durch belastbare Zahlen zum Mehrwert eines konkreten Features für den Nutzer als zentrales Entscheidungskriterium unterstützt. Das ist möglich, da die Szenario-Datenbank eine Quantifizierung der Häufigkeit und Ausprägung funktionaler Szenarien erlaubt. Der Mehrwert wird dem geschätzten Aufwand zur Umsetzung (Entwicklungs-, Freigabe sowie Materialeinzelkosten) gegenübergestellt (vgl. 6.1) und dann im Vergleich zu anderen Features priorisiert.

Während der Phase der Anforderungsdefinition (*Zieldefinition, Konzeptdefinition*) wird bei der konkreten Ausgestaltung des möglichen und sinnvollen Wertebereichs von Fahrfunktionen unterstützt, indem die Szenarien auf logischer Ebene (vgl. 2.9) betrachtet werden. Auch an dieser Stelle spielt der Kompromiss zwischen der durch RVT ermittelten Feature-Verfügbarkeit sowie den geschätzten Kosten eine wichtige Rolle.

Abschließend kommen die Ergebnisse der RVT auch im Bereich *Versuch und Erprobung* zum Einsatz, indem durch eine multikriterielle Optimierung Routen mit einer maximierten Szenario-Effizienz berechnet werden können. Das bedeutet, dass auf diesen Testrouten besonders viele der für den jeweiligen Untersuchungszweck relevanten Szenarien liegen, also eine hohe Szenariohäufigkeit vorliegt. Außerdem ist es möglich, gezielt Regionen zu identifizieren, in denen sich konkrete Szenarien mit seltenen Parameterwertkombinationen befinden, die getestet werden sollen. Die Ergebnisse der RVT-Analysen lassen sich also an diversen Stellen gewinnbringend in den etablierten Entwicklungs-

prozess integrieren.

Zur Durchführung und Anwendung des RVT-Frameworks sind mehrere und spezifische Rollen notwendig (vgl. 4.5.2), die nur durch eine abgestimmte Zusammenarbeit auch zielführende Ergebnisse versprechen. Bei der prototypischen Anwendung des RVT im Rahmen des Forschungsprojekts hat sich gezeigt, dass das Vorhandensein der Strukturen und Rollen, die eine Zusammenarbeit wie oben skizziert erlauben, entscheidend beeinflusst, ob und wie schnell das Verfahren erfolgreich angewendet werden kann und hilfreiche Ergebnisse liefert.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein neues Framework zur datenbasierten Validierung automatisierter Fahrfunktionen anhand von repräsentativen, virtuellen Testfahrten entwickelt. Der Trend zunehmender Mobilität, steigender Automatisierung und somit technisch aufwendigeren Systemen führt zusammen mit kürzeren Entwicklungszeiten zu Herausforderungen bei der Systementwicklung automatisierter Fahrfunktionen. Durch die zunehmende Verbreitung solcher Systeme (insbesondere bis zum Automatisierungslevel 2+) steigen die Erwartungen der Nutzer und es ergibt sich ein größerer Bedarf für die Validierung. Dazu wurden in Kapitel 1 drei Forschungsfragen definiert, die den Bedarf abseits des umfangreich erforschten Sicherheitsnachweises für Systeme $\geq$ Level 3 adressieren. Insbesondere für die folgeschweren, produktbezogenen Entscheidungen zu Beginn des Entwicklungsprozesses fehlen Methoden, die anhand von datenbasierten Auswertungen Aussagen zum System ermöglichen bevor dieses überhaupt entwickelt ist.

Dazu wurden in Kapitel 2 die notwendigen Begrifflichkeiten zur Fahraufgabe, dem Featureumfang von Fahrfunktionen, der ODD von Fahrfunktionen, der Szenario-Terminologie sowie zu prädiktiven Fahrfunktionen definiert. Zusätzlich wurden die ADAS und ADS nach Automatisierungslevel systematisch eingeordnet und eine logische Systemarchitektur für eine PCC definiert, die als Grundlage für eine spätere Modellbildung der PCC dient. Dafür wurde auch in die Begrifflichkeiten des Straßennetzes, die Repräsentation in digitalen Karten, sowie die Definition, Entstehung und Nutzung von FCD eingeführt.

Aufbauend auf diesen Grundlagen wurde in Kapitel 3 der Stand der Wissen-

schaft und Forschung zur Validierung automatisierter Fahrfunktionen beleuchtet. Ausgehend von der Definition der Begrifflichkeiten im Testumfeld und der Modellbildung, wurden die klassischen Validierungsmethoden, wie XiL, FOT und Probandenstudien vorgestellt und systematisch eingeordnet. Zusätzlich wurden die Ansätze, die aktuell schon Gegenstand der Forschung sind, diskutiert. Dazu gehören das Szenario-basierte Testen, die Resimulation, die virtuelle Testfahrt sowie der Shadow Mode. Als zentraler Begriff wurde zudem die „Repräsentativität von Szenarien“ eingeführt, die für Fragestellungen bei der Validierung von Fahrfunktionen, vorgibt, dass die Häufigkeitsverteilung von Szenarien in der Teststimulation der realen Szenarioverteilung beim Nutzer entsprechen soll.

Anhand der speziellen Herausforderungen bei der Validierung prädiktiver Funktionen wurden in Kapitel 4 neue Anforderungen an Validierungsverfahren abgeleitet, die durch die bestehenden Validierungsmethoden noch nicht erfüllt werden. Dazu wurde eine Bewertungsmatrix für die Validierungsverfahren erstellt, in der die virtuelle Testfahrt als bestes Verfahren identifiziert wurde. Die repräsentative Validierung mit virtuellen Testfahrten ist ein neues Konzept, das aus den Bestandteilen Routengenerator (für die virtuelle Testfahrt), MiL-Simulation und Szenario-basierter Bewertung besteht. Das Konzept wurde in Form eines Frameworks vorgestellt, das je nach Untersuchungsziel befüllt und konfiguriert wird. Dabei unterstützt der ebenfalls eingeführte Prozess zur Entwicklung und Anwendung des Frameworks.

Über den Routengenerator wird die Teststimulation mit repräsentativen Routen umgesetzt, die in Kapitel 5 erforscht wurde und ein Kernelement dieser Dissertation darstellt. Basierend auf den gesammelten Anforderungen an die generierten Routen, wurden bestehende Verfahren zur RGE ermittelt und erstmalig systematisch eingeordnet. Zur Bewertung von erzeugten Routen wurde eine Methode, die auf FCD als Referenz beruht, konzipiert sowie ein Prozess zur Aufbereitung von FCD entwickelt. Nach der Implementierung von zwei Verfahren zur RGE wurden diese auf einem Evaluierungsgebiet in Deutschland hinsichtlich definierter Kriterien untersucht. Die DKM erzielte dabei die

beste Abdeckungseffizienz, es wurde also ein großer Anteil des Streckennetzes für die insgesamt zurückgelegte Strecke der virtuellen Testfahrten abgedeckt. Auf der anderen Seite erzielt die STO mit einem Algorithmus zur stochastischen Routenberechnung basierend auf der Bevölkerungsdichte und einer empirischen Routenlängenverteilung die besten Ergebnisse hinsichtlich der Repräsentativität, sodass die STO auch für die Analysen im Kapitel 6 zum Einsatz kam.

Dabei wurde das konzeptuelle RVT-Framework aus Kapitel 4 auf eine PCC angewandt, mit dem Untersuchungsziel, den PCC-Featureumfang zu bewerten und gleichzeitig eine Quantifizierung der ODD vorzunehmen. Dafür wurden die Metriken *Verfügbarkeit*, *Erlebbarkeit*, *Übernahmehäufigkeit* definiert, die zur Bewertung der PCC herangezogen wurden. Zusätzlich wurde die PCC mit einem definierten Feature-Set modelliert, sodass die PCC neue prädiktive Szenarien beherrscht, ohne, dass der Fahrer eingreifen muss. Dadurch erhöht sich die Verfügbarkeit und Erlebbarkeit des Systems. Das vereinfachte längsdynamische Modell erlaubt skalierbare RVT in der Region Westeuropa mit ca. 18.000 virtuellen Fahren und knapp 290.000 km Gesamtstrecke, was etwa 900.000 extrahierten, konkreten Szenarien entspricht.

Zur Verifikation des verwendeten PCC-Modells wurde ein Abgleich mit aufgezeichneten Messdaten einer FOT durchgeführt. Die Szenario-basierte Auswertung hat die dem Untersuchungsziel entsprechende Modellgüte bestätigt. Mit dem Vorgehen wurde für Westeuropa für das untersuchte Feature-Set der PCC eine mittlere Verfügbarkeit von 93,8% ermittelt. Das bedeutet, durch prädiktive Features kann ein ACC um bis zu 19,4%-Punkte in der Verfügbarkeit verbessert werden.

Durch dieses neue Instrument hat ein OEM nun erstmals die Möglichkeit, schon vor der ersten Implementierung eines Features, eine Abschätzung zu treffen, wie groß der Mehrwert des Features sein wird. Dazu wurde auch eine Analyse auf Länderebene durchgeführt, die zeigt, dass es regionale Unterschiede bei der Erlebbarkeit der PCC in Westeuropa gibt. Damit die RVT den Weg in die breite Anwendung findet, wurde abschließend eine mögliche Integra-

tion in den etablierten Produktentwicklungsprozess vorgestellt. Es bestehen Anwendungsmöglichkeiten während der Produktplanungsphase, der Anforderungsdefinition, des Versuchs und der Erprobung sowie auch serienbegleitend nach Markteinführung. Die Erfahrungen bei der prototypischen Umsetzung des Verfahrens zeigten, dass das Zusammenspiel aus den drei Rollen Systementwickler, Simulationsingenieur sowie Data Scientist vielversprechend ist für eine zügige und erfolgreiche Implementierung der RVT.

7.2 Wissenschaftlicher Beitrag

Die Entwicklung neuer automatisierter Fahrfunktionen stellt OEMs vor methodische Herausforderungen. Aufbauend auf bisher etablierten Methoden wurde in dieser Dissertation ein Framework entwickelt, das bei der Konzeptionierung und Validierung im Rahmen der Funktionsentwicklung unterstützt. Basierend auf den herausgearbeiteten, offenen Herausforderungen, motiviert durch prädiktive Fahrfunktionen, wird folgender wissenschaftlicher Beitrag geleistet:

- Es wurde eine Methode zur Bewertung von virtuellen Testfahrt-Routen hinsichtlich ihrer Repräsentativität zu in der Realwelt gefahrenen Routen konzipiert. Dabei wird die Häufigkeit von virtuell befahrenen Streckensegmenten statistisch abgeglichen mit der von realen Fahrten, indem FCD auf diesen Streckensegmenten gezielt aggregiert werden. Zusätzlich wurden weitere Metriken zur Bewertung der Routen abgeleitet (Abdeckungseffektivität, Abdeckungseffizienz, Streckenlänge). Damit ist es nun möglich, beliebige Ansätze zur Routengenerierung hinsichtlich ihrer Repräsentativität zu bewerten.
- Ein modulares Framework wurde entwickelt, welches das Prinzip virtueller Testfahrten mit einer Stimulation durch repräsentative Testfahrt-Routen und einer Szenario-basierten Auswertung kombiniert. Das Framework enthält einen Prozess zur Modellierung des SUT. Zusätzlich wurden Anwendungs- und Integrationsmöglichkeiten in den etablierten Ent-

wicklungsprozess aufgezeigt. Dieses Werkzeug unterstützt bei einer systematischen, datenbasierten Validierung.

- Verschiedene Verfahren zur Routengenerierung wurden erstmals systematisch eingeordnet und hinsichtlich ihrer Eigenschaften verglichen. Neue Ansätze zur Routengenerierung können dort ebenfalls eingeordnet werden.
- Es wurde eine quantitative ODD-Analyse einer PCC durchgeführt und Metriken zur Validierung (Verfügbarkeit, Erlebbarkeit, Übernahmehäufigkeit) entwickelt. In diesem Kontext wurde eine vereinfachte Modellierung der Bewegungsplanung einer PCC inklusive der Verifikation anhand von Referenzdaten aus einem FOT durchgeführt. Dieser Beitrag unterstützt fundierte Entscheidungen darüber, welche Funktionsfeatures entwickelt werden sollen.
- Ein statistischer Nachweis der Ortsabhängigkeit der Szenarioausprägung einer Fahrfunktion wurde erbracht. Anhand der räumlichen Autokorrelation zwischen verschiedenen Regionen wurde die Metrik *Erlebbarkeit* analysiert. Dadurch können Cluster identifiziert werden, die eine Reduktion des Testaufwands bei der Freigabe von Systeme erlauben.

7.3 Ausblick

Nachdem in dieser Dissertation erstmals virtuelle Testfahrten auf realen Routen durchgeführt werden, können hier nicht alle Fragen auf diesem Feld beantwortet werden. Im Folgenden werden Anknüpfungspunkte für weitergehende Forschung diskutiert.

Für den Ansatz der stochastischen Routengenerierung wurde eine empirische Routenlängenverteilung angenommen, die aus einer Quelle zum Mobilitätsverhalten in Deutschland stammt (vgl. 5.3). Diese Verteilung wurde auch für die Routengenerierung in den anderen Ländern in Westeuropa herangezogen. Es

ist denkbar und wahrscheinlich, dass in anderen Ländern ein anderes Mobilitätsverhalten zu beobachten ist, was für eine genauere Routengenerierung zu beachten wäre. Darüber hinaus bestünde die Möglichkeit, dass die Routenlängenverteilung auch vom Startpunkt der Route abhängt. Routen, die in urbanem Umfeld starten, haben gegebenenfalls eine geringere Länge, als solche, die im ländlichen Bereich verlaufen. Dies könnte ein Ausgangspunkt für eine tiefergehende Untersuchung sein.

Bei der Routengenerierung ist ebenfalls noch die Frage zu klären, wie viele virtuelle Testfahrten durchgeführt werden sollten, um eine „ausreichende“ Abdeckung zu erzielen (vgl. 5.3.4). Dies könnte gemessen werden am Anteil des Streckennetzes, der durch die virtuelle Testfahrt mindestens einmal befahren wurde. Eine andere Metrik könnte auf einer Analyse der Parameterverteilung der auftretenden, konkreten Szenarien beruhen, die mit zunehmender Zahl an virtuellen Routen in eine Sättigung gerät. Entsprechend dem Gedanken der Repräsentativität sind solche Szenarien, die nur sehr selten auftreten, aber auch nicht so relevant für die Gesamtbewertung. An der Stelle ist weiterführende Forschung notwendig.

Bei der Modellbildung für den PCC-Anwendungsfall wurde der Planungsalgorithmus stark vereinfacht und über eine Verifikation die Nutzbarkeit nachgewiesen. Alternativ wäre es hier auch denkbar, Toleranzen zu berücksichtigen, die über die weiteren Verarbeitungsschritte im Rahmen einer Fehlerfortpflanzung auch im Endergebnis abgebildet werden können (wie bereits diskutiert in 6.5). Somit könnten die Szenarien für verschiedene Fälle extrahiert werden, um die Sensitivität hinsichtlich Unsicherheiten bei den Eingangsdaten oder der Modellbildung zu berücksichtigen.

Auch mit dem neuen Verfahren der repräsentativen, virtuellen Testfahrt konnten mit dem vorliegenden Anwendungsfall noch nicht alle gewünschten Anforderungen für die Validierung automatisierter Fahrfunktionen erfüllt werden (vgl. 6.5). Durch die Verwendung zusätzlicher, skalierbarer Datenquellen könnte dieses Thema weiter adressiert werden. Eine Möglichkeit sind xFCD, die für einen Großteil des Streckennetzes beschafft werden können und neben

der Positionsangabe auch Informationen über die dort gefahrene Geschwindigkeit enthalten. Für längsregelnde Systeme könnte dies auch als eine Art Referenz aufgefasst werden, gegen die dann die geplante Geschwindigkeitstrajektorie verglichen wird. Dadurch sind möglicherweise Rückschlüsse auf fehlerhafte Kartendaten oder fehlende Funktionsfeatures möglich.

Während in dieser Dissertation ausschließlich Anwendungsfälle aus der ADAS-Domäne in Betracht gezogen wurden, wäre es auch denkbar, das Framework auf andere Systeme im Fahrzeug zu übertragen, sofern diese ebenfalls eine Abhängigkeit von Streckendaten aufweisen. So wäre es beispielsweise möglich, im automatisierten Betrieb mit einer PCC in einem verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeug zu analysieren, welche Schaltvorgänge im Getriebe zu erwarten sind und wie sich dieses für verschiedene Regionen unterscheidet. Für jeden neuen Anwendungsfall muss jeweils geprüft werden, ob die nötigen Eingangsdaten, wie hier die Kartendatenbank, in ausreichender Qualität und Abdeckung zur Verfügung stehen.

A Anhang

A.1 Empirische Bestimmung des Luftlinienfaktors

Es ist das Ziel, Start- und Zielpunkte einer Route i so zu definieren, dass die resultierende Routenlänge $l_{Route,i}$ der gewünschten Routenlänge $l_{soll,i}$ entspricht. Für eine Einzelroute kann die Luftliniendistanz $l_{Luft,i}$ zwischen Start- und Zielpunkt über die Abbildung $f: \mathbb{R}_0^+ \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ mit $l_{Route,i} \mapsto l_{Route,i} / f_{Luft,i}$ berechnet werden. Allerdings ist der dafür benötigte Faktor $f_{Luft,i}$ unbekannt.

Daher wird ein iteratives Vorgehen nach Abb. A.1 vorgeschlagen, bei dem für eine Anzahl von n_{Reg} Routen zunächst ein mittlerer Faktor f_{Luft} bestimmt wird, der dann näherungsweise bei der Generierung der n_S eigentlichen Routen herangezogen wird. Dem Vorgehen liegt die Annahme zugrunde, dass $f_{Luft} = const.$ gilt.

In beiden Schritten zur Routengenerierung kommen die in Algorithmus 1 beschriebenen Zusammenhänge zum Einsatz. Dadurch, dass jeweils dieselben empirischen Verteilungen herangezogen werden, wird sichergestellt, dass der auf diese Weise gefundene mittlere Faktor f_{Luft} repräsentativ ist für die im zweiten Schritt zu generierenden Routen.

Die im ersten Schritt erzeugten Paare $(l_{Luft,i}, l_{Route,i})_{i=1}^{n_{Reg}}$, sind in Abb. A.2 zusammen mit dem Ergebnis der linearen Einfachregression durch den Ursprung dargestellt. Die Steigung der Regressionsgeraden ergibt sich unter Anwendung der Kleinste-Quadrate-Schätzung [126] zu

$$f_{Luft} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{Reg}} l_{Luft,i} l_{Route,i}}{\sum_{i=1}^{n_{Reg}} l_{Luft,i}^2}. \quad (\text{A.1})$$

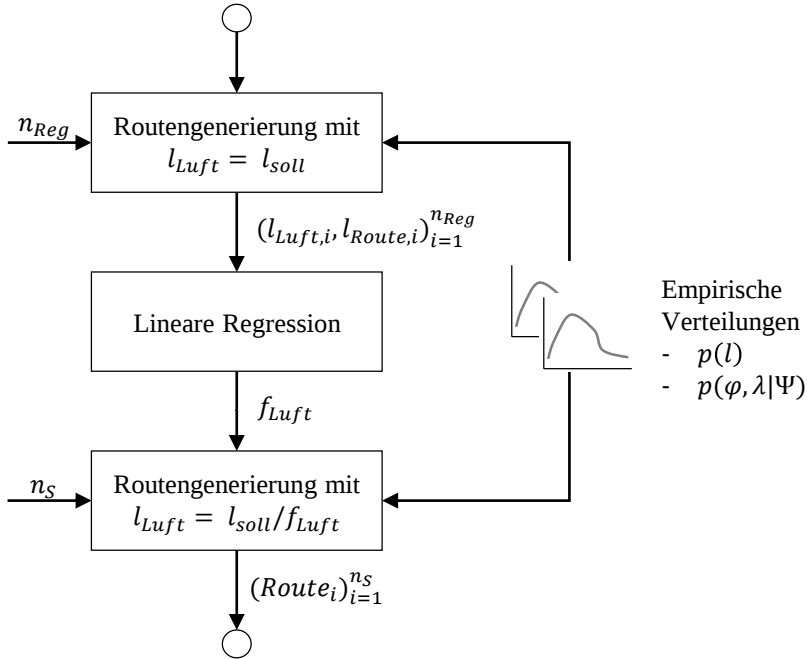


Abbildung A.1: Prozess zur empirischen Bestimmung und Anwendung des Faktors f_{Luft} . Die Routengenerierung erfolgt anhand der Verteilung $p(l)$ der Sollroutenlängen l_{soll} sowie der Verteilung $p(\varphi, \lambda | \Psi)$ der Bevölkerungszahl Ψ in Abhängigkeit der Geokoordinaten φ und λ .

Vereinfachend wird in der vorliegenden Untersuchung $n_{Reg} = n_S$ gesetzt, da die Generierung der Routen vernachlässigbare Aufwände in Bezug auf Kosten und Zeit hervorruft. Ist dies in anderen Anwendungen nicht gegeben, ist es auch denkbar, $n_{Reg} < n_S$ zu wählen, also den Stichprobenumfang zu verringern [78].

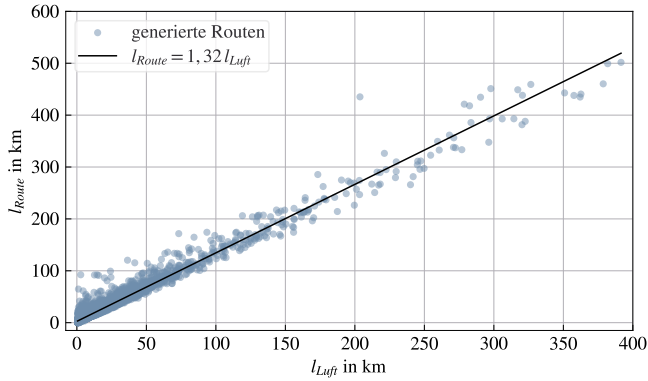


Abbildung A.2: Routenlänge l_{Route} über Luftliniendistanz l_{Luft} für $n_{Reg} = n_S = 10.000$ generierte Routen sowie Regressionsgerade durch den Ursprung

A.2 Parameter und Ergebnisse der Routengenerierung

Für die RGE anhand der DKM werden fünf Varianten mit unterschiedlichen Parameterkombinationen getestet (vgl. Tabelle A.1). Die Varianten unterscheiden sich hinsichtlich der Ausprägung der Parameter Radius r_d , Überlappung v sowie Winkelauflösung α .

Tabelle A.1: Routengenerierung anhand der DKM mit den Parametervariationen im Radius r_d , der Überlappung v sowie der Winkelauflösung α

Variante	r_d in km	v in %	α in °
DKM1	2	0	90
DKM2	10	10	60
DKM3	10	10	30
DKM4	50	20	45
DKM5	50	50	45

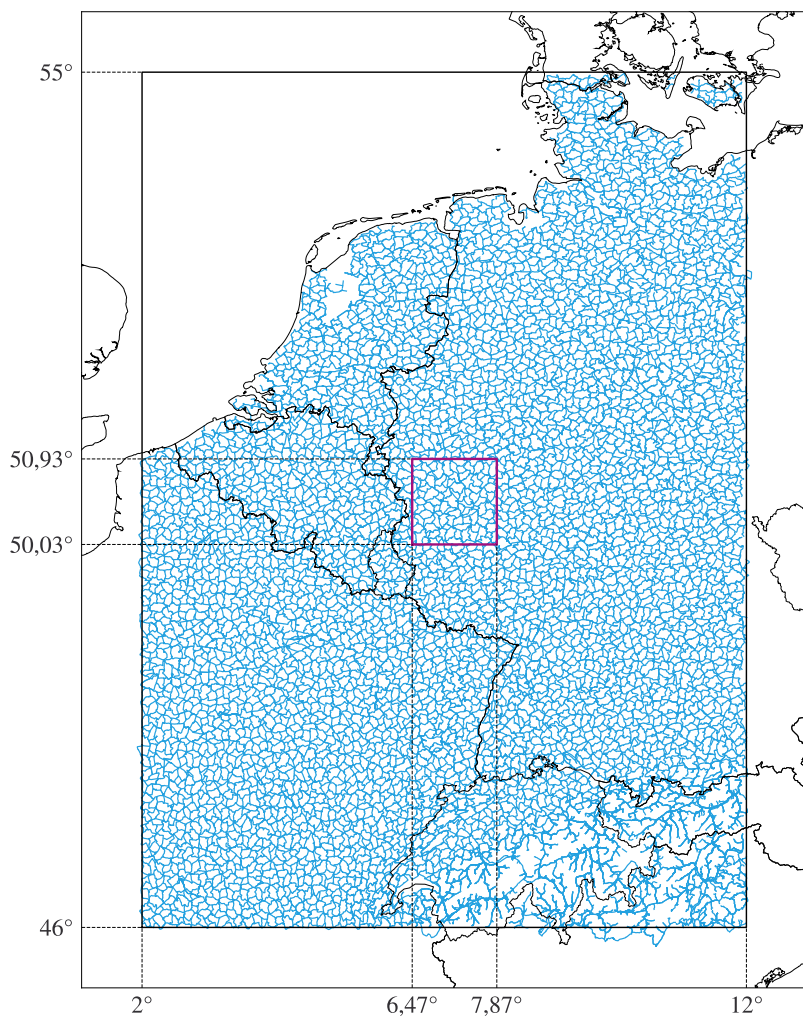


Abbildung A.3: Mit deterministischem Ansatz (DKM2) innerhalb des Untersuchungs-
gebiets generierte virtuelle Routen

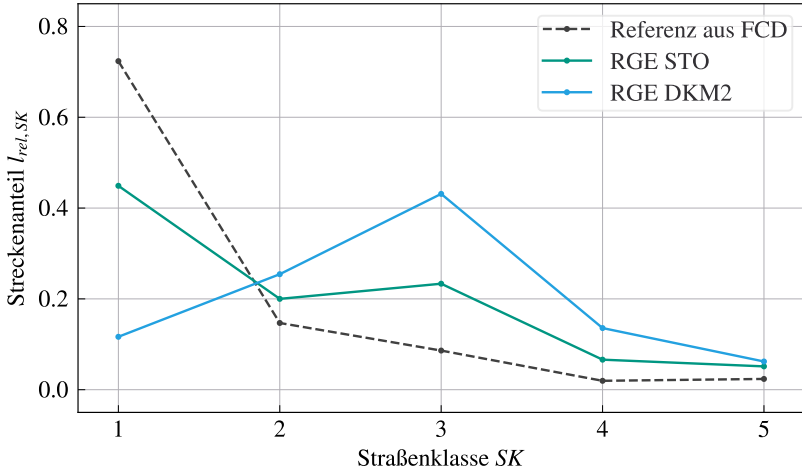


Abbildung A.4: Vergleich der Streckenanteile pro Straßenkategorie für zwei Routengenerierungsverfahren und die Referenz aus Verkehrsschwarmdaten (FCD)

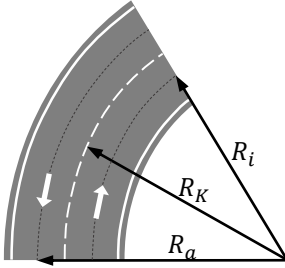
A.3 Aufbereitung und Vorverarbeitung der SD-Kartendaten

Im Modell für die exemplarisch untersuchte PCC (vgl. 6.2.2) wird für die Querführung angenommen, dass sich das Fahrzeug mittig im Fahrstreifen bewegt. Aus dieser Annahme wird dann abgeleitet, dass somit auch der Krümmungsverlauf der Fahrzeugtrajektorie bekannt ist, da dieser der Krümmung des jeweiligen Fahrstreifens entspricht (ausgenommen Abbiegesituationen).

In den verwendeten SD-Kartendaten wird jedoch keine Fahrstreifenindividuelle Krümmungsinformation ausgegeben, sondern lediglich die Fahrbahnkrümmung¹. Im Falle einer Fahrbahn mit zwei nebeneinanderliegenden, unterschiedlich gerichteten Fahrstreifen gibt die Kartendatenbank die Krümmung des Mittelstreifens (markiert mit dem Radius R_K in Abb. A.5) an. Unter Einbezug der Fahrstreifenbreite b_{FS} ergeben sich daraus die Radien der beiden

¹ Begriffsdefinition Straße s. Abb. 2.10

Fahrbahn mit zwei unterschiedlich gerichteten Fahrstreifen



Fahrbahn mit drei gleich gerichteten Fahrstreifen

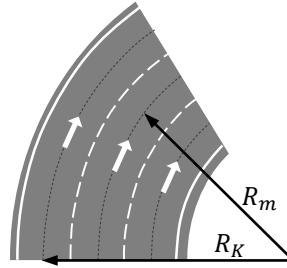


Abbildung A.5: Bei Fahrbahnen mit unterschiedlich gerichteten Fahrstreifen (links) wird in den SD-Kartendaten der Radius der Mittellinie R_K als Krümmungsinformation verwendet. Bei Fahrbahnen mit Fahrstreifen, die ausschließlich Einbahnverkehr vorsehen (rechts), bezieht sich der angegebene Krümmungsradius R_K in den Kartendaten auf die Mitte des in Fahrtrichtung äußeren, linken Fahrstreifens (umgekehrt bei Linksverkehr). Diese Information muss bei der Berechnung des Bahnradius der resultierenden Trajektorie berücksichtigt werden.

Richtungsfahrstreifen $R_i = R_K - b_{FS}/2$ und $R_a = R_K + b_{FS}/2$.

Besteht die Fahrbahn aus mehreren gleich gerichteten Fahrstreifen (im Beispiel in Abb. A.5 drei), so gibt die Karte den Krümmungsradius R_K als Radius der Mitte des äußerst linken Fahrstreifens an². Vereinfachend wird pauschal für mehrstreifige Fahrbahnen der Krümmungsradius um eine Fahrstreifenbreite versetzt, sodass $R_m = R_K - b_{FS}$ gilt, da in der Karte nicht in allen Situationen eine akkurate Information über die Fahrstreifenanzahl vorliegt. In der virtuellen Testfahrt der PCC wird kein konkreter Fahrstreifen vorgegeben, sodass ohnehin nicht definiert ist, welcher Radius gewählt werden soll.

Es wird zudem angenommen, dass mehrstreifige Straßenabschnitte überwiegend im höheren Geschwindigkeitsbereich vorliegen, in dem die Krümmungs-

² Dies gilt für Rechtsverkehr. Bei Linksverkehr ist es entsprechend der äußerst rechte Fahrstreifen in Fahrtrichtung.

radien erfahrungsgemäß größer sind, sodass der relative Fehler durch die Ungenauigkeit der Fahrstreifenbreiten und -auswahl akzeptiert werden kann. Für eine quantitative Fehlerabschätzung wird auf Abschnitt 6.2.3 verwiesen.

A.4 Anwendung des RVT-Frameworks auf eine PCC in Westeuropa

Für die Modellbildung der PCC wird ein Systemverhalten des SUT definiert, das maximale Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der Straßengeometrie vorgibt. Für Abbiegungen von einer Kante auf die nächste (z.B: Kreuzungen) wird ein Ansatz gewählt, bei dem die maximale Geschwindigkeit anhand einer Kennlinie basierend auf dem betragsmäßigen Abbiegewinkel abgeleitet wird (s. Abb. A.6).

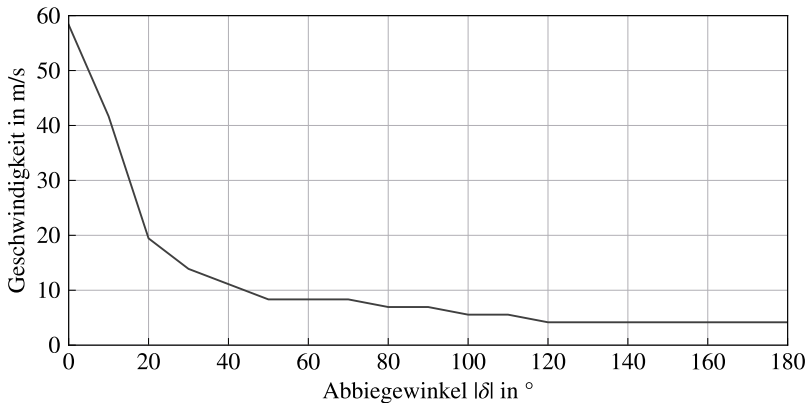


Abbildung A.6: Kennlinie der Abbiegegeschwindigkeit bei gegebenem Abbiegewinkel

Analog zur Untersuchung der Abweichungen der Geschwindigkeiten zwischen SIM und FOT zu Szenariobeginn (v_0), wird hier auch nochmal der Box-Plot mit den absoluten sowie relativen Abweichungen der Szenariozielgeschwindigkeiten (v_1) ermittelt (s. Abb. A.7). Es wird beobachtet, dass die mittlere,

Tabelle A.2: Eckdaten zur RVT Simulation der PCC in Westeuropa

Parameter	Wert
Anzahl der virtuellen Fahrten	18.871
Anzahl der extrahierten konkreten Szenarien	904.164
Gesamtstrecke der virtuellen Fahrten	286.156 km
Gesamtzeit der virtuellen Fahrten	4.217 h

relative Geschwindigkeitsabweichung für VG-Schilder knapp über 10% liegt. Diese im Vergleich zu den anderen funktionalen Szenarien hohe Abweichung relativiert sich bei Betrachtung der absoluten Werte, die bei ca. 2 km/h liegen und somit akzeptiert werden.

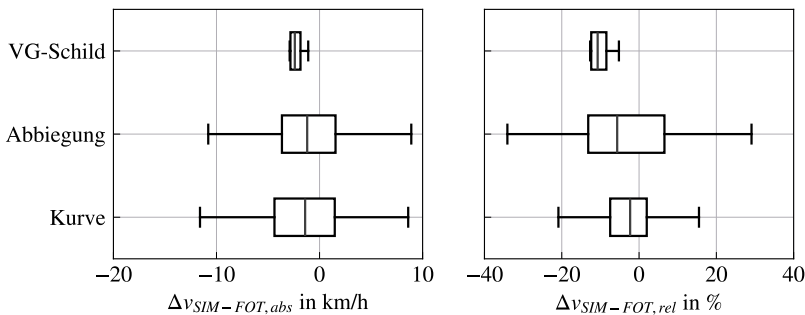


Abbildung A.7: Box-Plot mit der absoluten und relativen Abweichung der Szenariozielgeschwindigkeit zwischen (SIM) und Realfahrt (FOT) für die funktionalen Szenarien VG-Schild, Abbiegung und Kurve.

Für die RVT Simulation werden knapp 19.000 virtuelle Fahrten durchgeführt. Dabei wird eine Gesamtstrecke von ca. 290.000 km zurückgelegt (s. Tabelle A.2).

Als zentrales Land in Westeuropa mit hoher Bevölkerungszahl wird in Deutschland mit knapp 80.000 km die größte Gesamtstrecke virtuell zurückgelegt (s.

Abb. A.8). Großbritannien, Italien sowie Frankreich folgen mit jeweils etwa 60.000 km pro Land.

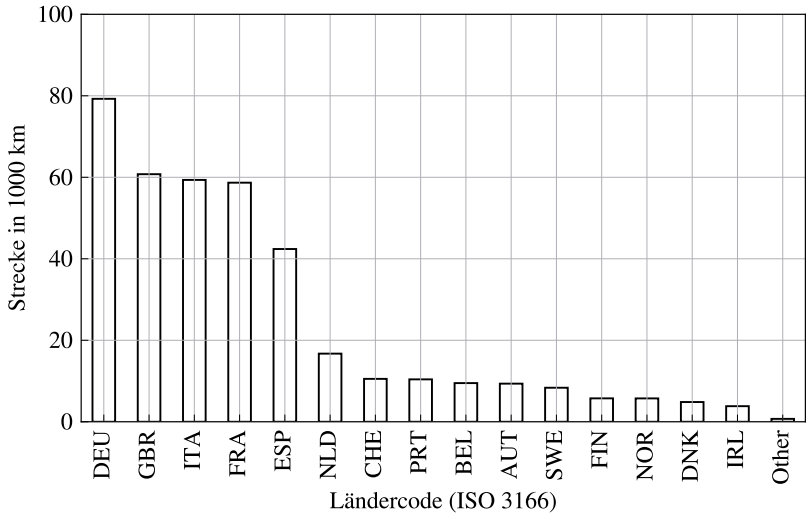


Abbildung A.8: In der Simulation gefahrene Distanz mit dem RVT-Framework anhand virtueller Testfahrt pro Land in Westeuropa

Tabelle A.3: Konfiguration der Parameter für die PCC-Analyse

RVT-Schritt	Parametername	Typ	Wert
[F1]	Geografische Region (Ländercode)	Liste	['DEU', 'FRA', 'ITA', 'ESP', 'PRT', 'NLD', 'BEL', 'LUX', 'GBR', 'DNK', 'CHE', 'AUS', 'IRL', 'NOR', 'SWE', 'AND', 'MCO', 'FIN']
[F1]	Soll-Anzahl virtueller Fahrten	Integer	20.000
[F1]	Methode zur Routen-generierung	String	'STO'
[F3]	Feature Abbiegung	Boolean	wahr
[F3]	Feature Kurve	Boolean	wahr
[F3]	Feature Tempolimit	Boolean	wahr
[F3]	Feature Kreisverkehr	Boolean	wahr
[F3]	Feature VG-Schild	Boolean	wahr
[F3]	Feature Stoppschild	Boolean	wahr
[F3]	Features Engstelle, Fußgängerüberweg, LSA, Bahnübergang	Boolean	falsch
[F3]	PCC $v_{SL,min}$	Integer	20 km/h
[F3]	PCC v_{max}	Integer	150 km/h
[F3]	PCC $v_{Par,Stopp}$	Integer	0 km/h
[F3]	PCC $v_{Par,VG}$	Integer	20 km/h
[F3]	PCC $a_{x,neg}$	Integer	2,0 (m/s^2)
[F3]	PCC $a_{x,pos}$	Integer	1,8 (m/s^2)
[F5]	Metrik Verfügbarkeit	Boolean	wahr
[F5]	Metrik Erlebbarkeit	Boolean	wahr
[F5]	Metrik Übernahmehäu-figkeit	Boolean	wahr

Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufbau der Dissertation	5
2.1	Drei-Ebenen-Modell nach [27]	8
2.2	Automatisierungslevel nach SAE J3016 TM [93]	12
2.3	Beispielhafte hierarchische Gliederung von Elementen zur Definition der ODD	15
2.4	Logische Systemarchitektur für Regelungssysteme im Fahrzeug (nach [95] und [3])	17
2.5	Angepasstes Architekturschaubild nach [1] und ergänzt durch [27]	20
2.6	Modell des Produktentwicklungsprozesses in der Automobilindustrie [99]	22
2.7	Darstellung der Automotive-SPICE Prozessschritte im V-Modell nach [37]	24
2.8	Ebenen zur Zusammensetzung von Szenarien nach PEGASUS	27
2.9	Drei Abstraktionsebenen von Szenarien als UML-Diagramm (Darstellung nach [108])	28
2.10	Schematische Darstellung eines Straßenabschnitts mit seinen Bestandteilen am Beispiel einer sechsstreifigen Bundesautobahn	30
2.11	Repräsentation des Streckennetzes in digitalen Karten	33
2.12	Beispiel für räumlichen Vorausschauhorizont der Onboard-Sensorik	41
2.13	Logische Systemarchitektur der hier betrachteten PCC unterteilt in die Module Wahrnehmung, Planung sowie Aktorik (angepasst nach [3])	44
2.14	Beispiel für die prädiktive Geschwindigkeitsplanung einer PCC	46

2.15	Vergleichende Einordnung exemplarischer Fahrfunktionen hinsichtlich SAE-Level und ODD (SC = Stauchaffeur, ABC = Autobahnchauffeur, ABP = Autobahnpilot, PCC = Prädiktive Längsführung)	48
2.16	Beispielsituation für sequentielle Kantenwahl	52
2.17	Schematische Darstellung der Generierung von O/D-Paaren mit der DKM	55
3.1	Einflussfaktoren auf verschiedene Fahrerassistenzfunktionen (Darstellung angepasst nach [54])	59
3.2	Aufbau und Bestandteile eines logischen und konkreten Testfalls (Darstellung nach [100])	63
3.3	Struktur des Mensch-Maschine-Systems mit geschlossenem Regelkreis (nach [110])	67
3.4	Einordnung von XiL-Methoden hinsichtlich Systembestandteil und Realitätsnähe in real (R), emuliert (E) und simuliert (S)	68
3.5	Übersicht über Datenquellen zur Szenario-Generierung (Darstellung erweitert und angepasst nach [81])	77
4.1	Bewertung von Validierungsverfahren aus dem Stand der Wissenschaft und Technik hinsichtlich der identifizierten neuen Anforderungen	93
4.2	Technische Struktur des RVT-Frameworks zur skalierbaren Funktionsvalidierung	102
4.3	Entwicklungs- und Anwendungsprozess für Simulationen basierend auf dem RVT-Framework	104
4.4	Entwicklungsprozess für die Simulationskette nach V-Modell	105
4.5	Iterativer Prozess zur Modellentwicklung für das SUT und die Umgebungsrepräsentation	107
5.1	Verarbeitungsschritte der Floating Car Data (FCD) als Referenz zur Routenbewertung	115

5.2	Darstellung der verwendeten Bevölkerungszahlen	122
5.3	Kumulierte relative Häufigkeiten der Routenlängen	124
5.4	Schematische Darstellung der auf einen Kreisring reduzierten Grund- gesamtheit	125
5.5	Generierte virtuelle Routen aus STO	126
5.6	Generierte Routen im Evaluierungsgebiet mit STO and DKM2 . .	131
5.7	Vergleich der Streckenanteile pro GZ	133
5.8	Verteilung der normierten kumulierten gefahrenen Distanz über der Routenlänge	136
6.1	Featureumfang der Fahrfunktionen GRA, ACC sowie PACC . . .	141
6.2	Prädiktive Szenarien	144
6.3	Reduzierte logische Systemarchitektur zur Modellierung der PCC	148
6.4	Kartesisches Fahrzeugkoordinatensystem entlang der Fahrzeugtra- jektorie	149
6.5	Simulation des geplanten Geschwindigkeitsverlaufs	154
6.6	Route zum Vergleich von Realfahrt und Simulation der PCC . . .	155
6.7	Vergleich von Realfahrt und virtueller Testfahrt mit einer PCC . .	156
6.8	Exemplarische prädiktive Verzögerung	158
6.9	Abweichung der Szenariozielgeschwindigkeit zwischen Simulati- on und Realfahrt	159
6.10	Gefahrenen Routen der virtuellen Testfahrten	161
6.11	Vorgehen zur Extraktion und Aggregation von Szenarien	162
6.12	PCC-Fahrerübernahmeszenarien im PEGASUS-Ebenenmodell . .	163
6.13	Ermittelte Verfügbarkeit der PCC in den simulierten Fahrten . . .	165
6.14	Auftretenshäufigkeit potenziell notwendiger Fahrerübernahmen . .	167
A.1	Prozess zur empirischen Bestimmung und Anwendung des Faktors f_{Luft}	188
A.2	Routenlänge l_{Route} über Luftliniendistanz l_{Luft} inklusive Regression	189
A.3	Generierte virtuelle Routen aus DKM2	190
A.4	Vergleich der Streckenanteile pro SK	191

A.5	Berechnung des Bahnradius anhand der Fahrbahnkrümmung aus der Karte	192
A.6	Kennlinie der Abbiegegeschwindigkeit	193
A.7	Abweichung der Szenariozielgeschwindigkeit zwischen Simulati- on und Realfahrt	194
A.8	Distanz virtuelle Testfahrt pro Land	195

Tabellenverzeichnis

2.1	Einteilung des Streckennetzes in fünf Straßenkategorien	32
2.2	Zuordnung exemplarischer Kartenschichten zu den PEGASUS-Ebenen	34
5.1	Eigenschaften des Streckennetzes sowie der FCD innerhalb des Evaluierungsgebiets untergliedert nach SK	129
5.2	Eigenschaften der als Referenz verwendeten FCD	130
5.3	Quantitativer Vergleich der Verfahren zur RGE hinsichtlich Zielmetriken	132
5.4	Parameter zur Durchführung des Chi-Quadrat-Homogenitätstests .	134
5.5	Vergleichende Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse der Verfahren zur RGE	135
6.1	Parameterausprägungen im vorliegenden PCC-Anwendungsfall . .	152
A.1	Parametervariationen für die Routengenerierung mit der DKM . .	189
A.2	Eckdaten zur RVT Simulation der PCC in Westeuropa	194
A.3	Konfiguration der Parameter für die PCC-Analyse	196

Formelverzeichnis

2.1:	Erforderlicher Weg bei prädiktiver Verzögerung	42
2.2:	Sequenz aus Geopositionen	51
5.1:	Mittlere quadratische Abweichung (MSE)	117
5.2:	Mittlerer gewichteter absoluter Fehler (MWAE)	117
5.3:	Empirische Teststatistik für den Chi-Quadrat-Test	118
5.4:	Zellhäufigkeiten für den Chi-Quadrat-Test	118
5.5:	Chi-Quadrat-Test: Vergleich der Teststatistik mit der Chi-Quadrat- Verteilung	118
5.6:	Wahrscheinlichkeit der Katenlängen-proportionalen Stichprobe .	134

Literaturverzeichnis

- [1] ABDULKHALEQ, Asim; LAMMERING, Daniel; WAGNER, Stefan; RÖDER, Jürgen; BALBIERER, Norbert; RAMSAUER, Ludwig; RASTE, Thomas; BOEHMERT, Hagen: A Systematic Approach Based on STPA for Developing a Dependable Architecture for Fully Automated Driving Vehicles. In: *Procedia Engineering* 179 (2017), Nr. Supplement C, S. 41–51
- [2] ALBRECHT, Marc; HOLZÄPFEL, Marc: Vorausschauend effizient fahren mit dem elektronischen Co-Piloten. In: *ATZextra* 23 (2018), Nr. 5, S. 34–37
- [3] BACH, Johannes: *Methoden und Ansätze für die Entwicklung und den Test prädiktiver Fahrzeugregelungsfunktionen*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 2018
- [4] BACH, Johannes; HOLZÄPFEL, Marc; OTTEN, Stefan; SAX, Eric: Reactive-Replay Approach for Verification and Validation of Closed-Loop Control Systems in Early Development. In: *SAE Technical Paper* (2017)
- [5] BACH, Johannes; LANGNER, Jacob; OTTEN, Stefan; SAX, Eric; HOLZÄPFEL, Marc: Test Scenario Selection for System-Level Verification and Validation of Geolocation-Dependent Automotive Control Systems. In: *International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)* IEEE, 2017, S. 203–210

- [6] BACH, Johannes; OTTEN, Stefan; SAX, Eric: Model Based Scenario Specification for Development and Test of Automated Driving Functions. In: *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)* IEEE, 2016, S. 1149–1155
- [7] BAGSCHIK, Gerrit; MENZEL, Till; RESCHKA, Andreas; MAURER, Markus: Szenarien für Entwicklung, Absicherung und Test von automatisierten Fahrzeugen. In: *11. Workshop Fahrerassistenzsysteme. Uni-DAS e. V.*, 2017, S. 125–135
- [8] BAMBERG, Günter; BAUR, Franz; KRAPP, Michael: *Statistik*. De Gruyter Oldenbourg, 2012
- [9] BAUER, Kai-Lukas; GAUTERIN, Frank: A Two-Layer Approach for Predictive Optimal Cruise Control. (2016)
- [10] BEGLEROVIC, Halil; METZNER, Steffen; HORN, Martin: Challenges for the Validation and Testing of Automated Driving Functions. In: *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2017*. Springer, 2018, S. 179–187
- [11] BELLA, Francesco: Driver Perception of Roadside Configurations on Two-Lane Rural Roads: Effects on Speed and Lateral Placement. In: *Accident Analysis & Prevention* 50 (2013), S. 251–262
- [12] BELLEM, Hanna; SCHÖNENBERG, Thorben; KREMS, Josef F.; SCHR-AUF, Michael: Objective Metrics of Comfort: Developing a Driving Style for Highly Automated Vehicles. In: *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour* 41 (2016), S. 45–54
- [13] BISHOP, Christopher M.: *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer, 2006

- [14] BOCK, Thomas: *Vehicle in the Loop-Test-und Simulationsumgebung für Fahrerassistenzsysteme*, Technische Universität München. Cuvillier Verlag, Diss., 2008
- [15] BOCK, Thomas: Bewertung von Fahrerassistenzsystemen mittels der Vehicle in the Loop-Simulation. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Springer, 2009, S. 76–83
- [16] BOEHM, Barry W.: A Spiral Model of Software Development and Enhancement. In: *Computer* 21 (1988), Nr. 5, S. 61–72
- [17] BOSSEL, Hartmut: Systeme, Modelle, Modellbildung, Modellverwendung: Ein Überblick. Version: 1992. https://doi.org/10.1007/978-3-322-83658-8_1. In: *Modellbildung und Simulation: Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme*. Vieweg+Teubner Verlag, 1992, 11–46
- [18] BREUER, Jörg: Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Springer, 2012, S. 55–68
- [19] BUBB, Heiner: Der Fahrprozess, Informationsverarbeitung durch den Fahrer. In: *4. Technischer Kongress 20./21. März 2002, Stuttgart*, VDA, 2002, S. 19–38
- [20] BURROUGH, Peter A.; MCDONNELL, Rachael: *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford university press, 1998
- [21] CENTER FOR INTERNATIONAL EARTH SCIENCE INFORMATION NETWORK - CIESIN - COLUMBIA UNIVERSITY: *Documentation for the Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4)*. Palisades NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.7927/H4D50JX4>. Version: 2016. – abgerufen am 15.01.2022

- [22] CHEN, Hong; GUO, Lulu; DING, Haitao; LI, Yong; GAO, Bingzhao: Real-Time Predictive Cruise Control for Eco-Driving Taking into Account Traffic Constraints. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* (2018)
- [23] COOPER, Robert G.: Perspective: The Stage-Gate® Idea-to-Launch Process-Update, What's New, and NexGen Systems. In: *Journal of product innovation management* 25 (2008), Nr. 3, S. 213–232
- [24] CZARNECKI, Krzysztof: Operational World Model Ontology for Automated Driving Systems - Part 1: Road Structure. In: *Waterloo Intelligent Systems Engineering Lab (WISE) Report, University of Waterloo* (2018)
- [25] CZARNECKI, Krzysztof: Operational World Model Ontology for Automated Driving Systems - Part 2: Road Users, Animals, Other Obstacles, and Environmental Conditions. In: *Waterloo Intelligent Systems Engineering Lab (WISE) Report, University of Waterloo* (2018)
- [26] DITTMAR, Rainer; PFEIFFER, Bernd-Markus: *Modellbasierte prädiktive Regelung*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2009
- [27] DONGES, Edmund: Das Prinzip Vorhersehbarkeit als Auslegungskonzept für Maßnahmen zur aktiven Sicherheitsmaßnahmen zur aktiven Sicherheit. In: *Das Mensch-Maschine System im Verkehr, VDI-Berichte* 948 (1992)
- [28] DRALLE, JENS: *Auto Motor und Sport: EU-Tempolimit-Warner ISA versagt in Tests*. <https://www.auto-motor-und-sport.de/verkehr/eu-tempolimit-warner-isa-versagt-in-tests/>. Version: 2024. – abgerufen am 28.06.2025
- [29] EBNER, Adrian; SAMAHA, Randa R.; SCULLION, Paul; HELMER, Thomas: Identifying and Analyzing Reference Scenarios for the Development and Evaluation of Preventive Pedestrian Safety Systems. In: *17th ITS World Congress ITS Japan ITS America ERTICO*, 2010

- [30] ELROFAI, Hala; WORM, Daniël; CAMP, Olaf O.: Scenario Identification for Validation of Automated Driving Functions. In: *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2016*. Springer, 2016, S. 153–163
- [31] FESTNER, Michael; EICHER, Alexandra; SCHRAMM, Dieter: Beeinflussung der Komfort- und Sicherheitswahrnehmung beim hochautomatisierten Fahren durch fahrfremde Tätigkeiten und Spurwechseldynamik. In: *Uni-DAS eV Workshop Fahrerassistenz und automatisiertes Fahren. Walting im Altmühltal*, 2017
- [32] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN-UND VERKEHRSWESEN: *Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA)*. 2008
- [33] FRÖBERG, Anders; HELLSTRÖM, Erik; NIELSEN, Lars: Explicit Fuel Optimal Speed Profiles for Heavy Trucks on a Set of Topographic Road Profiles. (2006)
- [34] FÜNFELD, Sebastian; HOLZÄPFEL, Marc; FREY, Michael; GAUTERIN, Frank: Stochastic Forecasting of Vehicle Dynamics Using Sequential Monte Carlo Simulation. In: *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles* 2 (2017), Nr. 2, S. 111–122
- [35] GASSER, Tom M.; ARZT, Clemens; AYOUBI, Mihir; BARTELS, Arne; BÜRKLE, Lutz; EIER, Jana; FLEMISCH, Frank; HÄCKER, Dirk; HESSE, Tobias; HUBER, Werner u. a.: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. In: *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Unterreihe Fahrzeugtechnik* (2012), Nr. 83
- [36] GASSER, Tom M.; SEECK, Andre; SMITH, Bryant W.: Rahmenbedingungen für die Fahrerassistenzentwicklung. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Springer, 2015, S. 27–54
- [37] GERMAN ASSOCIATION OF AUTOMOTIVE INDUSTRY: *Automotive SPICE Process Assessment and Process Reference Model*. <http://www.automotivespice.com/>. – abgerufen am 20.08.2020

- [38] GEYER, Sebastian; BALTZER, Marcel; FRANZ, Benjamin; HAKULI, Stephan; KAUER, Michaela; KIENLE, Martin; MEIER, Sonja; WEISSGERBER, Thomas; BENGLER, Klaus; BRUDER, Ralph u. a.: 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* 8 (2013), Nr. 3, S. 183–189
- [39] GLAUNER, Philipp; BLUMENSTOCK, Axel; HAUEIS, Martin: Effiziente Felderprobung von Fahrerassistenzsystemen. In: *UNI DAS eV (ed.)* 8 (2012), S. 5–14
- [40] GREKOUSIS, George: *Spatial Analysis Methods and Practice: Describe - Explore - Explain Through GIS*. Cambridge University Press, 2020
- [41] HAKULI, Stephan; KRUG, Markus: Virtual Integration in the Development Process of ADAS. In: *Handbook of Driver Assistance Systems* (2016), S. 159–176
- [42] HANKE, Horst; BRAAM, Werner; BREITENSTEIN, Jürgen; HABERMEHL, Klaus; HERBER, Franz-Rudolf; STEPHAN, Rainer; WETTERLING, Klaus: *Begriffsbestimmungen–Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb*. 2012
- [43] HIRSCHBERG, CLEMENS: *Auto Motor und Sport: Sicherheitsgewinn oder Zusatzaufwand durch Abschalten?* <https://www.auto-motor-und-sport.de/verkehr/assistenzsysteme-test-nervig-oder-hilfreich/>. Version: 2020. – abgerufen am 09.03.2022
- [44] HOLZINGER, Jürgen; BOGNER, Erik: Objective Assessment of Advanced Driver Assistance Systems. In: *ATZ worldwide* 119 (2017), Nr. 9, S. 16–19
- [45] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: ISO/IEC/IEEE Standard for Systems and Software Engineering - Software Life Cycle Processes. 2008. – Standard

- [46] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: Quality Management Systems - Fundamentals and Vocabulary. 2015. – Standard
- [47] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: Software and Systems Engineering - Vocabulary. 2010. – Standard
- [48] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: Intelligent Transport Systems - Adaptive Cruise Control Systems - Performance Requirements and Test Procedures. 2018. – Standard
- [49] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: Systems and Software Engineering - Architecture Description. Genf, CH, 2011. – Standard
- [50] ITZBUND - COMPETENCE CENTER V-MODELL XT: *V-Modell XT*. https://www.itzbund.de/DE/Produkte/V-Modell-XT/v-modell-xt_node.html. Version: 2020. – abgerufen am 20.08.2020
- [51] JAMES, Gareth; WITTEN, Daniela; HASTIE, Trevor; TIBSHIRANI, Robert: *An Introduction to Statistical Learning*. Bd. 112. Springer, 2013
- [52] JUNIETZ, Philipp; WACHENFELD, Walther; SCHÖNEMANN, Valerij; DOMHARDT, Kai; TRIBELHORN, Wadim; WINNER, Hermann: Gaining Knowledge on Automated Driving's Safety - The Risk-Free VAA-FO Tool. In: *Control Strategies for Advanced Driver Assistance Systems and Autonomous Driving Functions*. Springer, 2019, S. 47–65
- [53] KING, Christian; BACH, Johannes; OTTEN, Stefan; SAX, Eric: Identifikation von Fahrscenarien während einer virtuellen Testfahrt. In: *INFORMATIK 2017*. Gesellschaft für Informatik, Bonn, Gesellschaft für Informatik, Bonn, 2017, S. 1511–1516
- [54] KING, Christian; RIES, Lennart; LANGNER, Jacob; SAX, Eric: A Taxonomy and Survey on Validation Approaches for Automated Driving

- Systems. In: *2020 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)* IEEE, 2020, S. 1–8
- [55] KLITZKE, Lars; KOCH, Carsten; HAJA, Andreas; KÖSTER, Frank: Real-World Test Drive Vehicle Data Management System for Validation of Automated Driving Systems. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VEHITS), INSTICC. SciTePress*, 2019, S. 171–180
- [56] KLONECKI, Kamil; WACHENFELD, Walther; JUNIETZ, Philipp; WINNER, Hermann: Bewertung verschiedener Ansätze für die Verifikation und Validierung des automatisierten Fahrens. In: *VDI BERICHTE* 2335 (2018), S. 315–330
- [57] LANGNER, Jacob; BACH, Johannes; RIES, Lennart; OTTEN, Stefan; HOLZÄPFEL, Marc; SAX, Eric: Estimating the Uniqueness of Test Scenarios Derived from Recorded Real-World-Driving-Data Using Autoencoders. In: *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)* IEEE, 2018, S. 1860–1866
- [58] LANGNER, Jacob; BAUER, Kai-Lukas; HOLZÄPFEL, Marc; SAX, Eric: A Process Reference Model for the Virtual Application of Predictive Control Features. In: *2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)* IEEE, 2020, S. 1759–1764
- [59] LANGNER, Jacob; GROLIG, Hannes; OTTEN, Stefan; HOLZÄPFEL, Marc; SAX, Eric: Logical Scenario Derivation by Clustering Dynamic-Length-Segments Extracted from Real-World-Driving-Data. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VEHITS 2019)* (2019)
- [60] LIETZ, Holger; PETZOLDT, Tibor; HENNING, Matthias; HAUPT, Juliane; WANIELIK, Gerd; KREMS, J; MOSEBACH, H; SCHOMERUS, J;

- BAUMANN, M; NOYER, U: Methodische und technische Aspekte einer Naturalistic Driving Study. In: *FAT-Schriftenreihe* (2011), Nr. 229
- [61] LORKOWSKI, Stefan; BROCKFELD, Elmar; MIETH, Peter; PASSFELD, Bert; THIESSENHUSEN, Kai-Uwe; SCHÄFER, Ralf-Peter: Erste Mobilitätsdienste auf Basis von Floating Car Data. In: *Tagungsband zum 4. Aachener Kolloquium Mobilität und Stadt 75* (2003), S. 93–100
- [62] MARTI, Enrique; MIGUEL, Miguel A.; GARCIA, Fernando; PEREZ, Joshua: A Review of Sensor Technologies for Perception in Automated Driving. In: *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 11 (2019), Nr. 4, S. 94–108
- [63] MATTHAEI, Richard; MAURER, Markus: Autonomous Driving - a Top-Down-Approach. In: *at-Automatisierungstechnik* 63 (2015), Nr. 3, S. 155–167
- [64] MCKINSEY AND COMPANY: *Autonomous Driving's Future: Convenient and Connected*. <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/autonomous-drivings-future-convenient-and-connected>. Version: 2023. – abgerufen am 23.06.2025
- [65] MINISTERIUM FÜR VERKEHR DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN: *Mobilität in Nordrhein-Westfalen Daten und Fakten 2018/2019*. https://www.vw.nrw.de/verkehr/strasse/Strassenverkehr/Daten_und_Fakten/MFV041319_Broschuere_Mobilitaet_in_NRW_RZ_Web_150dpi.pdf. Version: 2019. – abgerufen am 08.03.2022
- [66] MINNERUP, Pascal; KESSLER, Tobias; KNOLL, Alois: Collecting Simulation Scenarios by Analyzing Physical Test Drives. In: *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems* IEEE, 2015, S. 2915–2920

- [67] MORAN, Patrick A.: Notes on Continuous Stochastic Phenomena. In: *Biometrika* 37 (1950), Nr. 1/2, S. 17–23
- [68] NAGEL, H-H; ENKELMANN, W; STRUCK, G: FhG-Co-Driver: From Map-Guided Automatic Driving by Machine Vision to a Cooperative Driver Support. In: *Mathematical and Computer Modelling* 22 (1995), Nr. 4-7, S. 185–212
- [69] NDS ASSOCIATION: *Navigation Data Standard (NDS)*. <https://nds-association.org/>. – abgerufen am 12.08.2020
- [70] NEUMANN-COSEL, Kilian von: *Virtual Test Drive: Simulation umfeld-basierter Fahrzeugfunktionen*. München, Universitätsbibliothek der TU München, Diss., 2014
- [71] NEUROHR, Christian; WESTHOFEN, Lukas; HENNING, Tabea; GRAAFF, Thies de; MÖHLMANN, Eike; BÖDE, Eckard: Fundamental Considerations Around Scenario-Based Testing for Automated Driving. In: *2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)* IEEE, 2020, S. 121–127
- [72] NOBIS, Claudia; KUHNIMHOF, Tobias: *Mobilität in Deutschland (MiD): Ergebnisbericht*. https://www.mobilitaet-in-deutschland.de/archive/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf. Version: 2018. – abgerufen am 14.04.2022
- [73] OLIVARES, Stephanie P.; REBERNIK, Nikolaus; EICHBERGER, Arno; STADLOBER, Ernst: Virtual Stochastic Testing of Advanced Driver Assistance Systems. In: *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2015*. Springer, 2016, S. 25–35
- [74] OLSEN, Patrick: *Cadillac Tops Tesla in Consumer Reports' First Ranking of Automated Driving Systems*. <https://www.cadillac.com/content/dam/cadillac/na/us/english/index/world-of->

- cadillac/super-cruise/super-cruise-updates011519/02-pdfs/Consumer_Reports_Article.pdf. Version:2018. – abgerufen am 26.03.2020
- [75] O’SULLIVAN, David; UNWIN, David: *Geographic Information Analysis*. John Wiley & Sons, 2003
- [76] PANNEN, David; LIEBNER, Martin; HEMPEL, Wolfgang; BURGARD, Wolfram: How to Keep HD Maps for Automated Driving up to Date. In: *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* IEEE, 2020, S. 2288–2294
- [77] PFEFFER, Raphael; SAX, Eric; SCHMIDT, Steffen: Real Data Based Validation of Highly Automated Driving Functions Using Simulation Methods. In: *ATZelectronics worldwide* 14 (2019), Nr. 11, S. 24–29
- [78] POKROPP, Fritz: *Stichproben - Theorie und Verfahren*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2017
- [79] PONN, Thomas; BREITFUSS, Matthias; YU, Xiao; DIERMEYER, Frank: Identification of Challenging Highway-Scenarios for the Safety Validation of Automated Vehicles Based on Real Driving Data. In: *2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)* IEEE, 2020, S. 1–10
- [80] PONN, Thomas; GNANDT, Christian; DIERMEYER, Frank: An Optimization-Based Method to Identify Relevant Scenarios for Type Approval of Automated Vehicles. In: *Proceedings of the ESV - International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Eindhoven, The Netherlands*, 2019, S. 10–13
- [81] PÜTZ, Andreas; ZLOCKI, Adrian; ECKSTEIN, Lutz: Absicherung hochautomatisierter Fahrfunktionen mithilfe einer Datenbank relevanter Szenarien. In: *Workshop Fahrassistenzsysteme und automatisiertes Fahren*, 2017, S. 161–168

- [82] RADU, Andreea; ROTHKRANTZ, Leon; NOVAK, Mirko: Digital Traveler Assistant. In: *Informatics in Control, Automation and Robotics*. Springer, 2013, S. 101–114
- [83] REIF, Konrad: *Automobilelektronik*. Bd. 2. Springer, 2007
- [84] RESS, Christian; ETERMAD, A; KUCK, Detlef; BOERGER, Marcus: Electronic Horizon-Supporting ADAS Applications With Predictive Map Data. In: *Proceedings of the 13th ITS World Congress, London*, 2006
- [85] REY, Sergio J.; ANSELIN, Luc: PySAL: A Python Library of Spatial Analytical Methods. In: *The Review of Regional Studies* 37 (2007), Nr. 1, S. 5–27
- [86] RICHTER, Dietrich; HEINDEL, Manfred: Grundzüge der Straßenplanung. In: *Straßen-und Tiefbau*. Springer, 2011, S. 39–74
- [87] RIEDMAIER, Stefan; NESENSOHN, Jonas; GUTENKUNST, Christian; DÜSER, Tobias; SCHICK, Bernhard; ABDELLATIF, Houssem: Validation of X-in-the-Loop Approaches for Virtual Homologation of Automated Driving Functions. In: *11th Graz Symposium Virtual Vehicle*, 2018
- [88] RIEDMAIER, Stefan; PONN, Thomas; LUDWIG, Dieter; SCHICK, Bernhard; DIERMEYER, Frank: Survey on Scenario-Based Safety Assessment of Automated Vehicles. In: *IEEE Access* 8 (2020), S. 87456–87477
- [89] RINNE, Horst: *Taschenbuch der Statistik*. Harri Deutsch Verlag, 2008
- [90] ROESENER, Christian; FAHRENKROG, Felix; UHLIG, Axel; ECKSTEIN, Lutz: A Scenario-Based Assessment Approach for Automated Driving by Using Time Series Classification of Human-Driving Behaviour. In: *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2016 IEEE 19th International Conference on IEEE*, 2016, S. 1360–1365

- [91] ROTHERMEL, Thomas; PITZ, Jürgen; KEHRER, Martin; REUSS, Hans-Christian: Deterministische Untersuchungen automatisierter Fahrfunktionen. In: *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift* 120 (2018), Nr. 4, S. 68–71
- [92] RUDERT, Steffen; TRUMPFHELLER, Jens: Vollumfänglich durchdacht: Der Produktentstehungsprozess. In: *Porsche Engineering Magazin* (2015), Nr. 1, S. 10–13
- [93] SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Automated Driving Systems for On-Road Motor Vehicles. Warrendale, PA, USA, 2018. – Standard
- [94] SAX, Eric: *Automatisiertes Testen Eingebetteter Systeme in der Automobilindustrie*. Carl Hanser Verlag GmbH und Co. KG, 2008
- [95] SCHÄUFFELE, Jörg; ZURAWKA, Thomas: *Automotive Software Engineering*. Springer, 2016
- [96] SCHÄUFFELE, Jörg; ZURAWKA, Thomas: Methoden und Werkzeuge in der Entwicklung. In: *Automotive Software Engineering*. Springer, 2016, S. 207–326
- [97] SCHEIDER, Thomas; BÖHM, Martin: Extended Floating Car Data in Co-Operative Traffic Management. In: *Traffic Data Collection and its Standardization*. Springer, 2010, S. 161–170
- [98] SCHERER, Svenja; DETTMANN, André; HARTWICH, Franziska; PECH, Timo; BULLINGER, Angelika C.; WANIELIK, Gerd: How the Driver Wants to be Driven - Modelling Driving Styles in Highly Automated Driving. In: *7. Tagung Fahrerassistenzsysteme*, 2015
- [99] SCHÖMANN, Sebastian O.: *Produktentwicklung in der Automobilindustrie: Managementkonzepte vor dem Hintergrund gewandelter Herausforderungen*. Springer-Verlag, 2012

- [100] SCHULDT, Fabian: *Ein Beitrag für den methodischen Test von automatisierten Fahrfunktionen mit Hilfe von virtuellen Umgebungen*. Braunschweig, Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Diss., 2017
- [101] SCHULDT, Fabian; SAUST, Falko; LICHTER, Bernd; MAURER, Markus; SCHOLZ, Stephan: Effiziente systematische Testgenerierung für Fahrerassistenzsysteme in virtuellen Umgebungen. In: *Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und Eingebettete Systeme Für Transportmittel* (2013)
- [102] SCHWAB, Sebastian; LEICHSENRING, Tobias; ZOFKA, Marc R.; BÄR, Tobias: Consistent Test Method for Assistance Systems. In: *ATZ worldwide* 116 (2014), Nr. 9, S. 38–43
- [103] SHEKHAR, Shashi; XIONG, Hui: *Encyclopedia of GIS*. Springer Science & Business Media, 2007
- [104] SHEPPARD, Warren W.: *Practical Navigation*. World Technical Institute, 1922
- [105] SICILIANO, Bruno; KHATIB, Oussama: *Springer Handbook of Robotics*. Springer, 2016
- [106] SINNOTT, Roger W.: Virtues of the Haversine. In: *Sky and telescope* 68 (1984), Nr. 2, S. 158
- [107] SIPPL, Christoph; BOCK, Florian; WITTMANN, David; ALTINGER, Harald; GERMAN, Reinhard: From Simulation Data to Test Cases for Fully Automated Driving and ADAS. In: *IFIP International Conference on Testing Software and Systems* Springer, 2016, S. 191–206
- [108] STEIMLE, Markus; BAGSCHIK, Gerrit; MENZEL, Till; WENDLER, Jan T.; MAURER, Markus: Ein Beitrag zur Terminologie für den szenarienbasierten Testansatz automatisierter Fahrfunktionen. In: *AAET-*

Automatisiertes und vernetztes Fahren. Hrsg. von ITS Niedersachsen
(2018)

- [109] STEIMLE, Markus; MENZEL, Till; MAURER, Markus: A Method for Classifying Test Bench Configurations in a Scenario-Based Test Approach for Automated Vehicles. In: *arXiv preprint arXiv:1905.09018* (2019)
- [110] STRASSER, Benedikt: *Vernetzung von Test- und Simulationenmethoden für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen*, Technische Universität München. Cuvillier Verlag, Diss., 2012
- [111] THEMANN, Philipp; BOCK, Julian; ECKSTEIN, Lutz: Optimisation of Energy Efficiency Based on Average Driving Behaviour and Driver's Preferences for Automated Driving. In: *IET intelligent transport systems* 9 (2014), Nr. 1, S. 50–58
- [112] THORGEIRSSON, Adam T.; SCHEUBNER, Stefan; FÜNFELD, Sebastian; GAUTERIN, Frank: An Investigation Into Key Influence Factors for the Everyday Usability of Electric Vehicles. In: *IEEE Open Journal of Vehicular Technology* 1 (2020), S. 348–361
- [113] TOBLER, Waldo R.: A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. In: *Economic geography* 46 (1970), Nr. sup1, S. 234–240
- [114] ULBRICH, S; MENZEL, T; RESCHKA, A; SCHULDT, F; MAURER, M: Definition der Begriffe Szene, Situation und Szenario für das automatisierte Fahren. In: *10. Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS 2015*, 2015
- [115] U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION - FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION: *Highway Functional Classification Concepts, Criteria and Procedures*. https://www.fhwa.dot.gov/planning/processes/statewide/related/highway_functional_classifications/fcauab.pdf. Version: 2013. – abgerufen am 05.12.2021

- [116] VAN KEULEN, Thijs; NAUS, Gerrit; DE JAGER, Bram; VAN DE MOLENGRAFT, René; STEINBUCH, Maarten; ANEKE, Edo: Predictive Cruise Control in Hybrid Electric Vehicles. In: *World Electric Vehicle Journal* 3 (2009), Nr. 3, S. 494–504
- [117] VINCENTY, Thaddeus: Direct and Inverse Solutions of Geodesics on the Ellipsoid with Application of Nested Equations. In: *Survey review* 23 (1975), Nr. 176, S. 88–93
- [118] WACHENFELD, Walther; WINNER, Hermann: Die Freigabe des autonomen Fahrens. In: *Autonomes Fahren*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2015, S. 439–464
- [119] WANG, Cheng; WINNER, Hermann: Overcoming Challenges of Validation Automated Driving and Identification of Critical Scenarios. In: *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)* IEEE, 2019, S. 2639–2644
- [120] WANG, Wenshuo; ZHAO, Ding: Evaluation of Lane Departure Correction Systems Using a Regenerative Stochastic Driver Model. In: *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles* 2 (2017), Nr. 3, S. 221–232
- [121] WEBER, Hendrik; BOCK, Julian; KLIMKE, Jens; RÖSENER, Christian; HILLER, Johannes; KRAJEWSKI, Robert; ZLOCKI, Adrian; ECKSTEIN, Lutz: A Framework for Definition of Logical Scenarios for Safety Assurance of Automated Driving. In: *Traffic Injury Prevention* 20 (2019-06), S. S65–S70. <http://dx.doi.org/10.1080/15389588.2019.1630827>. – DOI 10.1080/15389588.2019.1630827
- [122] WISSENSCHAFTLICHER DIENST, DEUTSCHER BUNDESTAG: *Überblick über die Entwicklung von Mobilität und Ernährung in Deutschland seit dem 18. Jahrhundert*. <https://www.bundestag.de/resource/blob/505516/fac4deec70ea478612c8006398a8c2cf/wd-5-017-17-pdf-data.pdf>. – abgerufen am 14.04.2019

- [123] WON, Jung-Im; KIM, Sang-Wook; BAEK, Ji-Haeng; LEE, Junghoon: Trajectory Clustering in Road Network Environment. In: *2009 IEEE Symposium on Computational Intelligence and Data Mining* IEEE, 2009, S. 299–305
- [124] ZIEGLER, Julius; BENDER, Philipp; LATEGAHN, Henning; SCHREIBER, Markus; STRAUSS, Tobias; STILLER, C: Kartengestütztes automatisiertes Fahren auf der Bertha-Benz-Route von Mannheim nach Pforzheim. In: *Workshop Fahrerassistenzsysteme. Walting, Germany* Bd. 496, 2014
- [125] ZOFKA, Marc R.; KUHNT, Florian; KOHLHAAS, Ralf; RIST, Christoph; SCHAMM, Thomas; ZÖLLNER, J M.: Data-Driven Simulation and Parametrization of Traffic Scenarios for the Development of Advanced Driver Assistance Systems. In: *18th International Conference on Information Fusion (Fusion)* IEEE, 2015, S. 1422–1428
- [126] ZURMÜHL, Rudolf: *Praktische Mathematik: für Ingenieure und Physiker*. Springer-Verlag, 2013

Betreute studentische Arbeiten

- [127] BONCLER, Maciej: *Entwicklung einer Methode zur Bewertung der automatisierten Fahrzeuglängsführung bei Kurvenfahrt*. Bachelorarbeit. RWTH Aachen University, 2018.
- [128] CLAUSS, Alexander: *Aufbau einer Software-in-the-Loop-Simulation für ein prädiktives Längsregelsystem sowie deren Evaluierung anhand eines realen Fallbeispiels*. Bachelorarbeit. Hochschule Pforzheim, 2019.
- [129] FIEDLER, Florian: *Entwicklung einer Methode zur Ermittlung des Energieverbrauchs von hochautomatisierten Fahrzeugen im Realfahrbetrieb*. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, 2018.
- [130] SCHÜTTE, Tjark: *Inferenz von szenarienbasiertem Fahrverhalten durch Analyse von streckenbasierten Geschwindigkeitsdaten mit Bayes'schen Netzen*. Masterarbeit. Universität Duisburg-Essen, 2019.
- [131] VOLKMANN, Lara-Marie: *Verfahren zur Erkennung und Bereinigung fehlerhafter Tempolimits in veralteten Kartendaten unter Anwendung maschineller Lernverfahren*. Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2019.
- [132] ZHAO, Fenglin: *Bewertung einer automatisierten Längsführung mit maschinellen Lernverfahren*. Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2019.

Eigene Publikationen

- [133] ESSELBORN, Carl; ECKERT, Michael; HOLZÄPFEL, Marc; WAHL, Eric; SAX, Eric: *Method for a scenario-based and weighted assessment of map-based advanced driving functions*. In: *20. Internationales Stuttgarter Symposium*, S. 193–207. Springer, 2020.
- [134] ESSELBORN, Carl; MISERA, Leo; ECKERT, Michael; HOLZÄPFEL, Marc; SAX, Eric: *Map Attribute Validation using Historic Floating Car Data and Anomaly Detection Techniques*. In: *VEHITS*, S. 504–514, 2020.
- [135] LANGNER, Jacob; BACH, Johannes; OTTEN, Stefan; SAX, Eric; ESSELBORN, Carl; ECKERT, Michael; HOLZÄPFEL, Marc: *Framework for using real driving data in automotive feature development and validation*. In: *8. Tagung Fahrerassistenz*, 2017.