



Masterthesis Nr. 836/21 im Studiengang Mechanical and Process Engineering (30 CP)

von Leonard Smits

Voraussichtlicher Beginn: 05.10.2021

Bearbeitungsdauer: 6 Monate

Thema: Entwicklung einer Methode zur Generierung und Durchführung von Testfällen für die Verhaltens- und Trajektorienplanung automatisierter Fahrzeuge

Topic: *Development of a Method for Generating and Performing Test Cases for Behavior and Trajectory Planning of Automated Vehicles*

Fachgebiet Fahrzeugtechnik



Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner

Otto-Berndt-Straße 2
64287 Darmstadt

Bearbeiter:
Moritz Lippert M. Sc.
Tel. +49 6151 16 - 24244
Fax +49 6151 16 - 24205
moritz.lippert@tu-darmstadt.de
www.fahrzeugtechnik-darmstadt.de

Björn Klamann M. Sc.
Tel. +49 6151 16 - 24235
Fax +49 6151 16 - 24205
bjoern.klamann@tu-darmstadt.de
www.fahrzeugtechnik-darmstadt.de

Datum
30.09.21

Am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt (FZD) wird für das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt UNICARagil in Zusammenarbeit mit mehreren deutschen Universitäten an modularen und diensteorientierten automatisierten Fahrzeugen geforscht. Der Fokus liegt dabei auf der Vermeidung technologischer Altlasten und darauf, diese durch neue, disruptive Konzepte zu ersetzen. Die Absicherung erfolgt im Projekt nicht mit Schwerpunkt auf dem Gesamtsystem und für alle möglichen Strecken, sondern auf der individuellen Erprobung der einzelnen Module für eine spezifizierte Auswahl an Streckenabschnitten.

Den Streckenabschnitten werden nach einem neuen Verfahren Verhaltensregeln zugeordnet. Für die individuelle Erprobung einzelner Module werden konkrete Testfälle benötigt, die die Einhaltung der Verhaltensregeln überprüfen.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein Verfahren zu entwickeln, das aus den Verhaltensregeln individuelle Testfälle für die Verhaltens- und Trajektorienplanung entwickelt. Dazu sind zuvor einer Auswahl von Streckenabschnitten mit dem bei FZD entwickelten Verfahren Verhaltensregeln zuzuordnen. Die Umsetzung der Testfälle erfolgt dabei in der vorhandenen Simulationsumgebung.

Als Ergebnisse der Masterthesis sind nachzuweisen:

1. Die Literatur zum Stand der Technik der Szenario- und Testfallgenerierung ist ausgewertet.
2. Die Einarbeitung in die CarMaker-Simulation inkl. der zugrundeliegenden Kartenformate sowie in den Verhaltensplaner des Projekts UNICARagil und in die neuartige Verhaltensbeschreibung ist erfolgt und beschrieben.

Seite: 1/2



3. Anforderungen an die Testfälle und Szenarien der Verhaltens- und Trajektorienplanung sind abgeleitet.
4. Eine Methodik zur Ableitung von Testfällen und zugehörigen Szenarien der Verhaltens- und Trajektorienplanung ist auf Basis der neuartigen Verhaltensbeschreibung entwickelt.
5. Die Simulation ist zur Durchführung der Testfälle und Szenarien mit Hilfe geeigneter Referenzkarten erweitert.
6. Erste Testfälle und Szenarien sind abgeleitet, in der Simulation durchgeführt und bewertet.
7. Die Gesamtmethodik und Anwendung ist hinsichtlich der Anforderungen evaluiert.
8. Die Methodik des Vorgehens und der oben genannten Arbeitsschritte inklusive deren Diskussion sind dokumentiert.

Schwerpunkte der Bewertung:

- Methodik des Vorgehens
- Vollständigkeit
- Nachvollziehbarkeit und Belastbarkeit der Argumentation
- Qualität folgender abzuliefernder Ergebnisse:
 - Schriftliche Ausarbeitung und Dokumentation
 - Ersteller Programmcode und zugehörige Dokumentation
- Abschlusskolloquium

Die Abgabe sämtlicher Daten und des Quellcodes wird vorausgesetzt. Die Arbeit bleibt Eigentum des Fachgebiets. Auf das Merkblatt des Fachgebiets wird hingewiesen.

Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner

Moritz Lippert M. Sc.
(Betreuer)

Björn Klamann M. Sc.
(Co-Betreuer)

Entwicklung einer Methode zur Generierung und Durchführung von Testfällen für die Verhaltens- und Trajektorienplanung automatisierter Fahrzeuge

Masterthesis Nr. 836/21

Bearbeiter: Leonard Smits

| 2951296

Betreuer: Moritz Lippert, M. Sc.
Björn Klamann, M. Sc.



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



FAHRZEUGTECHNIK
TU DARMSTADT

Leonard Smits

Matrikelnummer: 2951296

Studiengang: Master Maschinenbau

Masterthesis Nr. 836/21

Thema: Entwicklung einer Methode zur Generierung und Durchführung von Testfällen für die Verhaltens- und Trajektorienplanung automatisierter Fahrzeuge

Eingereicht: 11. April 2022

Technische Universität Darmstadt

Fachgebiet Fahrzeugtechnik

Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner

Otto-Berndt-Straße 2

64287 Darmstadt

Veröffentlicht unter CC-BY 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

Erklärung

Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß § 22 Abs. 7 und § 23 Abs. 7 APB der TU Darmstadt

Hiermit versichere ich, Leonard Smits, die vorliegende Master-Thesis / Bachelor-Thesis gemäß § 22 Abs. 7 APB TU Darmstadt ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Mir ist bekannt, dass im Falle eines Plagiats (§38 Abs.2 APB) ein Täuschungsversuch vorliegt, der dazu führt, dass die Arbeit mit 5,0 bewertet und damit ein Prüfungsversuch verbraucht wird. Abschlussarbeiten dürfen nur einmal wiederholt werden.

Bei der abgegebenen Thesis stimmen die schriftliche und die zur Archivierung eingereichte elektronische Fassung gemäß § 23 Abs. 7 APD TU Darmstadt überein.

English translation for information purposes only:

Thesis Statement pursuant to § 22 paragraph 7 and § 23 paragraph 7 of APB TU Darmstadt

I herewith formally declare that I, Leonard Smits, have written the submitted thesis independently pursuant to § 22 paragraph 7 of APB TU Darmstadt. I did not use any outside support except for the quoted literature and other sources mentioned in the paper. I clearly marked and separately listed all of the literature and all of the other sources, which I employed when producing this academic work, either literally or in content. This thesis has not been handed in or published before in the same or similar form.

I am aware, that in case of an attempt at deception based on plagiarism (§38 Abs. 2 APB), the thesis would be graded with 5,0 and counted as one failed examination attempt. The thesis may only be repeated once.

In the submitted thesis, the written copies and the electronic version for archiving are pursuant to § 23 paragraph 7 of APB TU Darmstadt identical in content.

Matrikelnummer: 2951296

Datum / Date:

11.04.2022

Unterschrift / Signature:

L. Smits

Zusammenfassung

Die Entwicklung von hochautomatisierten Fahrzeugen liegt im Fokus der Forschung des Bereichs Fahrzeugtechnik. Solche Fahrzeuge versprechen unter anderem eine ökonomischere Flächennutzung in urbanen Gebieten, eine höhere Verkehrssicherheit und eine Verbesserung des Verkehrsflusses¹. Auf dem Weg zu solch einem Fahrzeug bestehen jedoch Herausforderungen entlang des gesamten Entwicklungsprozesses. Darunter fallen Herausforderungen in der Ableitung von Anforderungen, der tatsächlichen Entwicklung von Funktionen für automatisierte Fahrzeuge und auch in der Validierung dieser Funktionen. Im Rahmen des Projekts UNICARagil wird die Neuentwicklung eines hochautomatisierten Fahrzeugs angestrebt. Diese beinhaltet einen modularisierten Funktionsaufbau und zielt darauf ab, den anschließenden Absicherungsaufwand zu reduzieren.

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung einer Methodik zur Generierung von Testfällen, um die in UNICARagil entwickelte Verhaltens- und Trajektorienplanung zu validieren. Die Methodik wird anschließend verwendet, um Testfälle in einer Simulationsumgebung zu erstellen und so den aktuellen Funktionalitätsgrad der Verhaltens- und Trajektorienplanung zu bewerten. Bei Fahrzeugtechnik Darmstadt (FZD) wird zurzeit ein Konzept mit dem Namen Behavior-Semantic Scenery Description (BSSD) entwickelt, das vollumfänglich Verhaltensanforderungen aus einer Szenerie im Straßenverkehr semantisch beschreibt². Dabei wird die Szenerie in Räume mit konstanten Verhaltensanforderungen segmentiert, die als atomare Verhaltensräume bezeichnet werden. Dieses Konzept wird als Basis für die Generierung von Szenarien genutzt, da die Aufgaben der Verhaltens- und Trajektorienplanung eng mit diesen Anforderungen verknüpft sind.

In einem ersten Schritt werden abstrakte Szenarien generiert, in der Szenerien nur durch Attribute des BSSD-Konzepts auf Anforderungsebene beschrieben werden. Ein Hauptaugenmerk der Methodikentwicklung liegt darauf, einzelne Verhaltensanforderungen in möglichst begrenzten Szenerien zu überprüfen. Dafür werden verschiedene Topologien von Verhaltensräumen zur Überprüfung von Verhaltensanforderungen entwickelt. Aus diesem begrenzten Umfang resultiert ein limitierter Parameterraum. Es werden zusätzlich Verkehrsteilnehmer hinzugefügt, um die Interaktion der Verhaltens- und Trajektorienplanung mit diesen zu überprüfen. Im Anschluss an den Aufbau funktionaler Szenarien werden diese in reale, konkrete Szenarien übersetzt. Hierfür werden den Verhaltensanforderungen entsprechende reale Szenerieelemente gegenübergestellt, die Geometrie von Verhaltensräumen und die Bewegung von Verkehrsteilnehmern parametrisiert. Jedem konkreten Szenario werden Testfallkriterien zugeordnet, um eine Bewertung der Verhaltens- und Trajektorienplanung durchzuführen. Diese Kriterien leiten sich aus den Anforderungen an das Modul ab. Anschließend wird die Methodik implementiert, um in einer Simulationsumgebung die Funktionalität des Moduls in ersten Testfällen zu überprüfen. Dabei ist es möglich gewesen, einen Teil der bisher vorhandenen Fähigkeiten zu validieren. Allerdings zeigen die Ergebnisse der Testfälle, dass in gewissen Bereichen wie

¹ Möller, T. et al.: The future of mobility is at our doorstep (2019).

² Lippert, M. et al.: Behavior-Semantic Scenery Description (BSSD) of Road Networks for Automated Driving (2022).

beispielsweise der Planung der Geschwindigkeit sowie der Planung von Abbremsmanövern in gewissen Szenarien noch Entwicklungsbedarf herrscht.

Die vorliegende Arbeit erzeugt eine Grundlage für die effiziente und effektive Validierung der Verhaltens- und Trajektorienplanung. Allerdings benötigt insbesondere die Übersetzung funktionaler Szenarien in konkrete Szenarien noch weitere Spezifikationen. Durch die Umsetzung der Methodik in einer Simulationsumgebung ist es möglich, eine erste Einschätzung über den Funktionalitätsgrad der Verhaltens- und Trajektorienplanung zu erlangen.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	III
Formelzeichen- und Indexverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis	IX
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	2
1.2 Konkretisierung der Aufgabenstellung	3
1.3 Methodik des Vorgehens	3
2 Stand der Forschung und Technik	5
2.1 Begriffsklärung	5
2.1.1 Szenario, Szene und Szenerie	5
2.1.2 Darstellung verschiedener Formen von Szenarien.....	7
2.2 Ansätze zur Generierung von Szenarien.....	10
2.2.1 Ontologiebasierte Szenariogenerierung	10
2.2.2 Risikobasierte Szenariogenerierung.....	13
2.2.3 Informationsbasierte Szenariogenerierung	14
2.2.4 Anforderungsbasierte Szenariogenerierung.....	14
2.3 Aufbau eines Testkonzepts	16
2.3.1 Analyse.....	17
2.3.2 Testfallgenerierung	18
2.3.3 Testfalldurchführung.....	20
2.3.4 Testfallevaulation.....	21
2.4 Behavior-Semantic Scenery Description (BSSD).....	23
2.4.1 BSSD Road Network Representation	24
2.4.2 BSSD Attribute	25
2.5 Kartenformate	27
2.5.1 Lanelet2.....	28
2.5.2 Road 5	30
3 Anforderungsanalyse	33
3.1 Anforderungen an ein Testkonzept.....	33
3.2 Anforderungen an die einzelnen Testkonzeptebenen	35
4 Methodik zur Generierung funktionaler Szenarien.....	39
4.1 Analyse der Verhaltens- und Trajektorienplanung	39

4.2	Ableitung von Anforderungen an die Verhaltens- und Trajektorienplanung	42
4.3	Potentialanalyse von BSSD	54
4.3.1	Verhaltensanforderungen nach BSSD in einer urbanen Szenerie.....	54
4.3.2	Vorläufige Bewertung des Effizienzpotenzials von BSSD.....	58
4.4	Entwicklung einer BSSD Szenerie	61
4.4.1	Aufbau einer BSSD Szenerie.....	61
4.5	Aufbau eines BSSD Szenarios.....	71
4.5.1	Testziele in verschiedenen Szeneriesequenzen.....	71
4.5.2	Dynamische Elemente.....	76
4.5.3	Bestimmung eines Formats zur Informationsspeicherung.....	83
5	Methodik zur Generierung von Testfällen	86
5.1	Übersetzung funktionaler Szenarien in konkrete Szenarien	86
5.1.1	Geometrische Gestaltung von Szenerien	86
5.1.2	Übersetzung der funktionalen Szenerie	90
5.1.3	Variation von Systemeingängen	92
5.1.4	Dynamische Elemente und deren Verlauf	94
5.2	Bestimmung von Testfallkriterien	95
6	Implementierung der Methodik	97
6.1	Aufbau der Simulation	97
6.2	Erstellung und Durchführung von Testfällen.....	98
6.3	Auswertung von Testfällen	101
6.4	Durchführung und Auswertung verschiedener Testfälle	104
6.5	Evaluation der Verhaltens- und Trajektorienplanung.....	107
7	Diskussion der Ergebnisse und Ausblick.....	108
	Anhang.....	112
	Literaturverzeichnis	137

Formelzeichen- und Indexverzeichnis

Lateinische Buchstaben:

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
d	m	Abstand
v	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit

Abkürzungsverzeichnis

BSSD	Behavior-Semantic Scenery Description
ID	Identifikationsnummer
JOSM	Java OpenStreetMap Editor
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
LSA	Lichtsignalanlage
ODD	Operational Design Domain
OSM	OpenStreetMap
RASt	Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen
ROS	Robot Operating System
StVO	Straßenverkehrsordnung
TTC	Time-to-Collision
TTE	Time-to-Enter
VHR	(atomarer) Verhaltensraum
VZ	Verkehrszeichen
XML	Extensible Markup Language

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 Methodik der Arbeit	4
Abbildung 2-1: Darstellung der Zusammenhänge zwischen Szenario, Szene und Szenerie.....	6
Abbildung 2-2: Repräsentation eines Szenarios	6
Abbildung 2-3: Nutzung verschiedener Typen von Szenarien im Entwicklungsprozess	8
Abbildung 2-4: 4-Ebenen Modell	11
Abbildung 2-5: Aufbau eines Manövers	12
Abbildung 2-6: Entwicklung automatisierter Fahrzeuge nach Systems Engineering Grundsätzen ..	15
Abbildung 2-7: Funktionale Dekomponierung	16
Abbildung 2-8: Aufbau eines Testkonzepts.....	16
Abbildung 2-9: Bestandteile eines Testfalls	18
Abbildung 2-10: Verschiedene Möglichkeiten der kombinatorischen Testfallableitung	20
Abbildung 2-11: Ausprägungen der Testfalldurchführung.....	20
Abbildung 2-12: Hierarchischer Aufbau von BSSD.....	24
Abbildung 2-13: Übersetzung einer Szenerie in verschiedene Schichten von Lanelet2	30
Abbildung 2-14: Baumstruktur des Road5 Kartenformats	31
Abbildung 4-1: Aufbau der verschiedenen Module im Projekt UNICARagil	40
Abbildung 4-2: Struktur des Moduls zur Verhaltensplanung	41
Abbildung 4-3: Visualisierung der Anforderungen zum Verhalten „Fahrstreifen halten“	43
Abbildung 4-4: Visualisierung der Anforderungen zum Verhalten „Fahrstreifen wechseln“	44
Abbildung 4-5: Anforderungen zum Verhalten „Annähern an Verkehrsteilnehmer“	45
Abbildung 4-6: Anforderungen zum Verhalten „Auf LSA reagieren“	46
Abbildung 4-7: Anforderungen zum Verhalten „Überholen mit Fahrstreifenwechsel“	47
Abbildung 4-8: Anforderungen zum Verhalten bei Vorschriftzeichen	49
Abbildung 4-9: Anforderungen zum Verhalten bei Verkehrsflusszeichen.....	49
Abbildung 4-10: Anforderungen zum Verhalten bei Zufahrtsbeschränkungen.....	50
Abbildung 4-11: Anforderungen bei einem Fahrstreifenwechsel und Fahrstreifenverringerng	52
Abbildung 4-12: Anforderungen beim Überqueren eines Fußgängerüberwegs	53
Abbildung 4-13: Anforderungen bei Überholen auf dem eigenen Fahrstreifen	54
Abbildung 4-14: Visualisierung der Kreisverkehrbereiche anhand einer BSSD-Karte	57
Abbildung 4-15: Anforderungsmengen für ausgewählte Übergänge	60
Abbildung 4-16: Temporäre Veränderungen im Straßenverkehr	63
Abbildung 4-17: Methodik zur Generierung einer funktionalen Szenerie	64
Abbildung 4-18: BSSD Attribute für die Generierung einer funktionalen Szenerie	66

Abbildung 4-19: Reservation Link mit Längseinfahrt von Verkehrsteilnehmern	69
Abbildung 4-20: Variationen der longitudinalen Durchquerung.....	74
Abbildung 4-21: Durchfahrt mit angrenzenden Verhaltensräumen und Interaktionsmöglichkeiten.	75
Abbildung 4-22: Lateraler Übergang mit möglichen Bewegungen anderer Verkehrsteilnehmer	76
Abbildung 6-1: Programmablaufplan der Testfallauswertung.....	103
Abbildung 6-2: Aufbau von <i>lanelets</i> in JOSM	104
Abbildung 6-3: Darstellung des Geschwindigkeitsverlaufs.....	106

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Ausprägungen drei verschiedener Szenarioarten	9
Tabelle 3-1: Anforderungen auf Testkonzeptebene	34
Tabelle 3-2: Anforderungen an die Testobjektanalyse	35
Tabelle 3-3: Anforderungen an die Testfallgenerierung	36
Tabelle 3-4: Anforderungen an die Testfalldurchführung	37
Tabelle 3-5: Anforderungen an die Testfallauswertung	38
Tabelle 4-1: Longitudinale Verhaltensraumsequenzen ohne entsprechende reale Szenerien	68
Tabelle 4-2: Laterale Verhaltensraumsequenzen ohne entsprechende reale Szenerien	69
Tabelle 4-3: Kombinationsmöglichkeiten für Übergänge	72
Tabelle 4-4: Initiale Zustände und Fähigkeiten des Egofahrzeugs	78
Tabelle 4-5: Mögliche Ausgangszustände von motorisierten Verkehrsteilnehmern	79
Tabelle 4-6: Mögliche Ausgangszustände von Fußgängern	81
Tabelle 5-1: Querschnitte zweistreifiger Fahrbahnen	87
Tabelle 5-2: Straßenbegleitende Radwege	88
Tabelle 5-3: Sammlung der möglichen Fahrstreifenbreiten	88
Tabelle 5-4: Exposition von verschiedenen Arten von Niederschlag	93
Tabelle 5-5: Fahrdynamisches Profil verschiedener Verkehrsteilnehmer	95
Tabelle 5-6: Bewertungskriterien aufgeteilt nach Verhaltens- und Trajektorienplanung	96
Tabelle 6-1: Spezifizierungsmöglichkeiten für <i>lanelets</i>	99

1 Einleitung

Vor mehr als 40 Jahren kamen verschiedene Universitäten im Rahmen des Projekts UNI-CAR zusammen, um damals ein Fahrzeugmodell mit neuesten technischen Innovationen aufzubauen. Seit dieser Zeit hat sich die Automobilindustrie stark verändert und steht vor einer tiefgreifenden Transformation. So führen neue Entwicklungstrends wie Automatisiertes Fahren und die Wende zur Elektromobilität dazu, dass Entwicklungsprozesse immer komplexer und vernetzter werden³. Bisher hat die Automobilindustrie neue Systeme und Technologien in bereits bestehende Fahrzeugkonzepte integriert. Dies hatte den Vorteil, dass nur eine Anpassung bereits bestehender Strukturen notwendig war. Ein solcher evolutionärer Ansatz kommt nun allerdings an seine Grenzen, da Aufgaben wie automatisiertes Fahren auf SAE Level 4 oder Level 5 mit völlig neuen Herausforderungen verbunden sind. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse hat sich ein Konsortium verschiedener Universitäten, Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen im Projekt UNICARagil zusammengefunden. Dieses Projekt dient dazu, ein neues, disruptives Fahrzeugkonzept zu entwickeln. Besondere Schwerpunkte liegen hierbei auf den Bereichen „Automation, Betriebssicherheit, Informationssicherheit, Verifikation & Validierung sowie Modularisierung“.^{4a}

Eine der weitreichendsten Weiterentwicklungen besteht in der Erzeugung einer neuen E/E-Architektur. Diese ist vom Aufbau her dem menschlichen Gehirn nachempfunden. In einem ersten Schritt erfolgt die Wahrnehmung der Umgebung durch Sensormodule, die die Sinnesorgane darstellen. Diese Daten werden anschließend an das sogenannte Cerebrum weitergegeben, wo Funktionen wie die Verhaltens- und Trajektorienplanung angesiedelt sind. Die Hirnstamm-Ebene (*brainstem*) verfolgt anschließend die geplante Trajektorie, während die Rückenmark-Ebene (*spinal cord*) die Befehle zur Umsetzung der Trajektorie innerhalb eines Fahrdynamikmoduls realisiert. Entscheidend bei dieser neuen Architektur ist die Tatsache, dass durch die Erzeugung verschiedener Ebenen eine Zentralisierung von Funktionen stattfindet, wie es bisher bei üblichen Fahrzeugkonzepten nicht der Fall ist⁵. Diese Zentralisierung ist wichtig, um in komplexen Systemen klare Schnittstellen definieren zu können und um abschätzen zu können, inwiefern Systemveränderungen Konsequenzen für einzelne Funktionen haben.^{4b}

Des Weiteren wird während des Projekts UNICARagil nicht nur ein Fahrzeugkonzept entwickelt, sondern ein ganzheitliches Konzept, um automatisiertes Fahren zu ermöglichen. Dazu gehört neben der Neuentwicklung eines Fahrzeugs inklusive Möglichkeit von Car-to-X Kommunikation der Aufbau der relevanten Verkehrsinfrastruktur. Diese beinhaltet die Entwicklung einer Art Drohne (Infobiene) zur Beobachtung des Verkehrsgeschehens, einen Kontrollraum für die notfallmäßige Steuerung automatisierter Fahrzeuge sowie die Anbindung an Cloud-Dienste. Wichtig ist zudem der Aufbau einer Vehicle-to-Vehicle Kommunikation. Sowohl Cloud-Dienste als auch Vehicle-to-Vehicle

³ Buckl, C. et al.: Informations-und Kommunikationstechnologie im Fahrzeug der Zukunft (2011).

⁴ Woopen, T. et al.: UNICARagil - Disruptive Modular Architectures for Agile, Automated Vehicle Concepts, a: S. 3.; b: S. 5-6

⁵ Cvijetic, N.; Tomazin, T.: Entwicklung einer zentralisierten Rechnerarchitektur für autonome Fahrzeuge (2021).

Kommunikation bieten die Möglichkeit, Informationen zu teilen und zu evaluieren. Durch diese Kommunikationsmöglichkeiten wird ein vollständigeres Bild des Straßenverkehrs aufgebaut⁶.

Dieser vollständig neue Ansatz zur Entwicklung automatisierter Fahrzeuge verspricht auch in Bezug auf die Absicherung von Fahrzeugfunktionen vorteilhaft zu sein. Grund hierfür ist die Modularität der einzelnen Fahrzeugsysteme. Das Ziel besteht darin, eine Absicherung auf Modulebene durchzuführen, ohne dass es notwendig ist, nach anschließender Systemintegration Tests auf Systemebene durchzuführen. Diese Strategie wäre mit einer erheblichen Reduzierung des Freigabeaufwands verbunden.

1.1 Motivation

Der Wegfall der menschlichen Rückfallebene bei SAE Level 4 und Level 5 des automatisierten Fahrens hat weitreichende Konsequenzen für den zu erbringenden Sicherheitsnachweis. Bei der Nutzung von bisherigen Assistenzsystemen ist der Mensch hauptverantwortlich für das Verhalten im Straßenverkehr. Daher wurde auf der Grundlage von beispielhaften Situationen in Kombination mit der Fahrerlaubnisprüfung eine Metrik geschaffen, die dazu dient, eine Aussage über die Sicherheit des Systems Fahrer-Fahrzeug zu treffen^{7a}. Diese Metrik darf nun allerdings nicht auf das automatisierte System übertragen werden, da in diesem Fall das Absolvieren einer Fahrerlaubnisprüfung durch das autonome Fahrzeug nicht als Prüfung ausreicht. Dies liegt unter anderem an der mangelnden Kenntnis über das Sozialverhalten zwischen Verkehrsteilnehmern untereinander^{7b}.

Somit ist es notwendig, auf andere Art und Weise die Sicherheit des automatisierten Systems zu überprüfen. Eine Möglichkeit hierfür stellt der statistische Sicherheitsnachweis von Winner et al. dar^{7c}. Als Grundlage dieser statistischen Überlegung wird versucht nachzuweisen, dass ein autonomes Fahrzeug doppelt so sicher wie ein menschlicher Fahrer ist. Bei Heranziehen eines Autobahnpioten als Testreferenz und der Anzahl der Getöteten zwischen zwei Unfällen als Kriterium für die Sicherheit eines Systems wird festgestellt, dass ein autonomes Testfahrzeug 6,62 Milliarden Testkilometer für solch einen Nachweis zurücklegen muss. Diese Berechnung veranschaulicht, dass ein streckenbasierter Ansatz aufgrund seiner (ökonomischen) Ineffizienz nicht zur Testdurchführung geeignet ist.

Als Folge dessen ergibt sich die Notwendigkeit nach einem alternativen Ansatz zum Lösen der Freigabeherausforderung zu suchen. Eine Möglichkeit zum Testen, Verifizieren und Validieren von automatisierten Fahrfunktionen bietet ein szenariobasierter Ansatz. Dieser Ansatz, der bereits beim Testen von Software verwendet wird, wurde das erste Mal im Projekt PEGASUS auf autonome Fahrzeuge angewendet⁸. Die Grundidee dieses Ansatzes besteht darin, dass durch die Identifizierung von besonders kritischen Szenarien die Überprüfung des Verhaltens in diesen kritischen Fällen auch weniger kritische Fälle abdeckt. Des Weiteren besteht ein Vorteil darin, dass solche Szenarien auch

⁶ Willke, T. et al.: A survey of inter-vehicle communication protocols and their applications (2009), S. 5.

⁷ Winner, H.; Wachenfeld, W.: Die Freigabe des autonomen Fahrens. a: S. 453; b: S. 454; c: S. 454-458

⁸ PEGASUS et al.: PEGASUS METHOD (2019).

simulativ dargestellt werden können. An diesen szenariobasierten Ansatz knüpft auch das Projekt UNICAR*agil* an. Diese Arbeit befasst sich damit, Testfälle zur Überprüfung der im Rahmen von UNICAR*agil* entwickelten Verhaltens- und Trajektorienplanung zu erstellen. Somit wird die Idee fortgeführt, einzelne Module zu überprüfen, um eine Überprüfung auf Systemebene zu vermeiden.⁹

1.2 Konkretisierung der Aufgabenstellung

Diese Arbeit beschäftigt sich damit, eine Methodik zur Generierung und Durchführung von Testfällen zu entwickeln, um eine Validierung der Verhaltens- und Trajektorienplanung durchzuführen. Testfälle werden auf Basis des bei Fahrzeugtechnik Darmstadt (FZD) entwickelten Behavior-Semantic Scenery Description (BSSD) Konzepts entwickelt¹⁰.

Nach der Entwicklung der Methodik werden prototypische Testfälle für die Verhaltens- und Trajektorienplanung generiert. Diese werden dann in einer Simulationsumgebung basierend auf den Kartenformaten Lanelet2 und Road 5 erstellt^{11,12}. Die Tests selbst werden in IPG Carmaker mit einer Schnittstelle zum Framework Robot Operating System (ROS) durchgeführt. Anschließend erfolgt eine Bewertung der Verhaltens- und Trajektorienplanung basierend auf den Ergebnissen der Testfälle. Zuletzt wird die Methodik kritisch diskutiert und ein Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen gegeben.

1.3 Methodik des Vorgehens

Um eine Methodik zur Szenario- und Testfallgenerierung zu erstellen und anschließend zu implementieren, wurde der gesamte Lösungsweg in insgesamt vier Prozesse unterteilt. Den Prozessen der Methodikentwicklung und -implementierung ist eine Literaturrecherche sowie eine Analyse des BSSD-Konzepts und der Kartenformate Road 5 und Lanelet2 vorgelagert. Die Entwicklung einer Methodik zur Szenario- und Testfallgenerierung ist in Abbildung 1-1 schematisch dargestellt.

Die Literaturrecherche dient dazu, eine Übersicht über den aktuellen Stand der Technik in Bezug auf Szenariogenerierung zu erhalten. Dazu gehört die Festlegung von Begriffen sowie eine Auswertung über die bisherigen Verfahren zu erstellen und erste Ideen zu einer eigenen Methodik zu entwickeln. Daneben findet eine Analyse der Anforderungen an Testfälle statt, deren Ergebnisse in die Methodikentwicklung miteinfließen.

Es folgt eine Analyse von BSSD. Diese dient dazu, die grundlegenden Ideen zur Schaffung von Verhaltensräumen nachzuvollziehen. Neben der Betrachtung von BSSD findet eine Untersuchung der Kartenformate Lanelet2 und Road 5 statt.

⁹ Klamann, B. et al.: Defining Pass-/Fail-Criteria for Particular Tests of Automated Driving Functions (2019).

¹⁰ Glatzki, F. et al.: Behavior-Semantic Scenery Description (BSSD) for the Development of Automated Driving Functions (2021).

¹¹ Poggenhans, F. et al.: Lanelet2: A high-definition map framework for the future of automated driving (2018).

¹² IPG Carmaker: Road 5 (2022).

Mit der Testfallgenerierung ist auch der Aufbau eines geeigneten Testkonzepts verbunden. Das bedeutet, dass eine Analyse des Testobjekts – der Verhaltens- und Trajektorienplanung – stattfindet. Daraus entstehen Evaluierungskriterien, die dazu dienen, das Abschneiden des Testobjekts zu bewerten. Die eigentliche Methodik wird in einem iterativen Prozess entwickelt. Aus den Ergebnissen der Literaturrecherche und dem Wissen über BSSD sowie dem Testobjekt wird zuerst ein Grundgerüst entwickelt, das anschließend konkretisiert wird. In jeder Iterationsschleife findet eine Anpassung bzw. Verfeinerung statt. Nach dem Abschluss der Methodikentwicklung werden erste Testfälle konzipiert.

Diese Testfälle werden dann in den relevanten Kartenformaten erstellt. Dabei basiert die Verhaltens- und Trajektorienplanung auf Lanelet2. Die visuelle Darstellung in der Software IPG Carmaker basiert dagegen auf dem OpenDrive oder auf dem Road 5 Format. Die Simulationsumgebung in Carmaker bietet dabei eine Schnittstelle zu ROS. Hierüber greift die Verhaltens- und Trajektorienplanung auf die Simulation zu. Nach der Durchführung dieser Tests findet zuerst eine Evaluierung der Testergebnisse statt, um die Verhaltens- und Trajektorienplanung zu validieren. Darauf folgt abschließend eine Bewertung der eigens entwickelten Methodik mit einem Ausblick auf weitere Entwicklungsmöglichkeiten der Methodik.

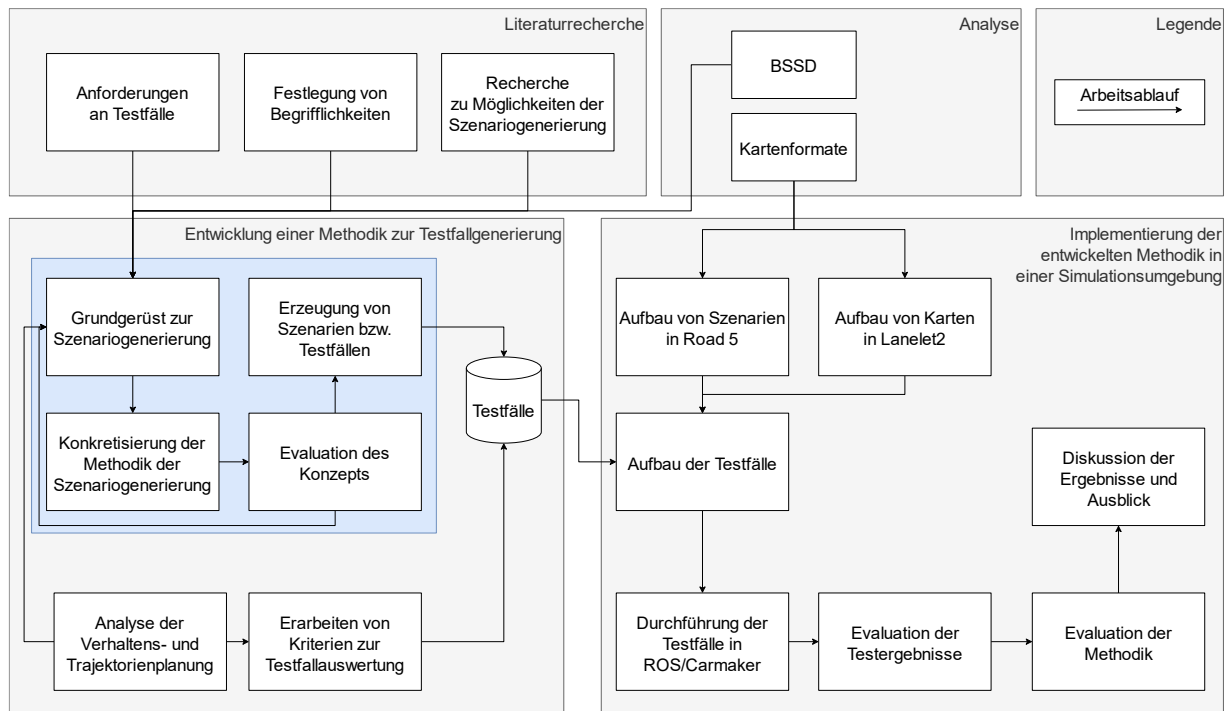


Abbildung 1-1 Methodik der Arbeit

2 Stand der Forschung und Technik

Im Folgenden wird ein Überblick über den Stand der Forschung im Bereich der Szenario- und Testfallgenerierung gegeben. Es wird zudem aufgezeigt, inwiefern Testfälle und Szenarien miteinander zusammenhängen. Um das Modul der Verhaltens- und Trajektorienplanung vollständig zu testen, ist es notwendig, ein gesamthaftes Testkonzept aufzustellen. Daher wird auf die einzelnen Bestandteile eines Testkonzepts eingegangen. Das Kernziel dieser Arbeit besteht darin, eine Methodik zur Testfallgenerierung auf Basis von BSSD zu entwickeln. Daher wird auch detailliert auf das BSSD Konzept eingegangen. Zuletzt wird auf die für die Implementierung relevanten Kartenformate Lanelet2 und das in Carmaker verwendete Format Road 5 eingegangen.

2.1 Begriffsklärung

Um automatisierte Fahrfunktionen zu testen, ist die Generierung eines Umfelds der zu testenden Module notwendig. Das Umfeld, in dem sich das Fahrzeug befindet, wird durch ein Szenario repräsentiert. Damit einher gehen eine Reihe an Begriffen, die im Folgenden genau definiert werden.

2.1.1 Szenario, Szene und Szenerie

Szenario

Die Nutzung von Szenarien ist heute nicht mehr nur auf wissenschaftliche Methodiken begrenzt. Szenarien werden beispielsweise im Bereich der strategischen Unternehmensplanung und in der Städteplanung genutzt. Allgemein lässt sich sagen, dass Szenarien genutzt werden, um Unsicherheit und verschiedene zeitliche Situationsverläufe zu modellieren.¹³

Aufgrund der uneinheitlichen Definition des Szenariobegriffs in der Wissenschaft, ist es notwendig, einen Begriff als Grundlage für weitere Ausführungen festzulegen. Go et al. definieren Szenarien so, dass diese im Wesentlichen Akteure und deren Ziele sowie die Sequenz von Aktionen und Events beschreiben¹⁴. Diese Definition wurde als Grundlage für die Entwicklung von Systemen genutzt. Eine weitere Definition des Begriffs Szenario von Ulbricht et al. ist speziell im Kontext des automatisierten Fahrens entwickelt worden und ist zugleich umfassend. Das bedeutet, dass sie alle möglichen Komponenten eines Szenarios miteinbezieht. Diese Definition besagt, dass

„Szenarien die zeitliche Entwicklung zwischen verschiedenen Szenen durch eine Sequenz an Szenen beschreiben. Jedes Szenario startet mit einer Anfangsszene. Aktionen & Events sowie Ziele & Werte können spezifiziert werden, um den zeitlichen Verlauf eines Szenarios zu charakterisieren. Anders als eine Szene umfasst ein Szenario eine bestimmte Zeitspanne.“¹⁵

¹³ Mietzner, D.: Begriff, Nutzen und Funktionen von Szenarien (2009).

¹⁴ Go, K.; Carroll, J. M.: The blind men and the elephant: Views of scenario-based system design (2004).

¹⁵ Ulbrich, S. et al.: Defining and Substantiating the Terms Scene, Situation, and Scenario for AD (2015).

Abbildung 2-1 illustriert den Aufbau eines Szenarios, der durch die Definition von Ulbrich et al. geschaffen wird. Auf die Bestandteile der Szene wird bei der genauen Begriffsdefinition eingegangen.

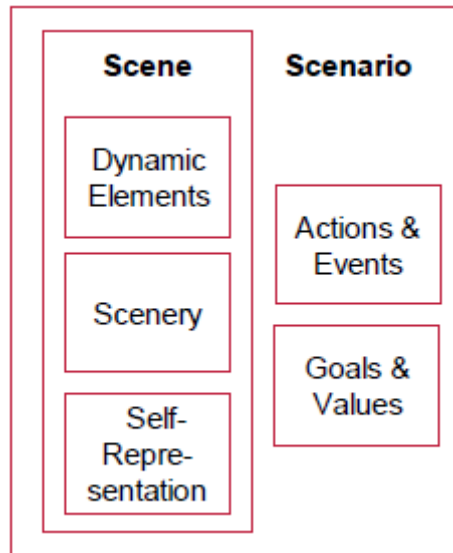


Abbildung 2-1: Darstellung der Zusammenhänge zwischen Szenario, Szene und Szenerie^{16a}

Abbildung 2-2 zeigt einen Graphen, der aus Knoten besteht, die über Kanten verbunden werden. Dabei stellen die Knotenpunkte einzelne Szenen dar, während die Kanten Aktionen und Events repräsentieren, die zu einer Folgeszene führen. Die Bilder unterhalb des Graphen repräsentieren die einzelnen Knotenpunkte des blauen Pfads während die Aktionstitel den zeitlichen Verlauf entlang der Kanten darstellen.

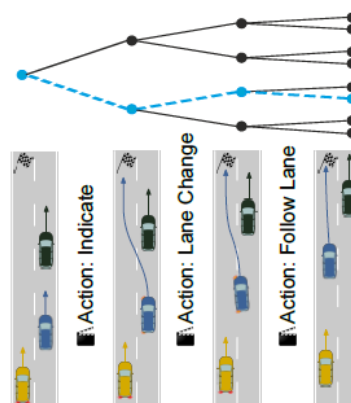


Abbildung 2-2: Repräsentation eines Szenarios^{16b}

Die Ausgestaltung von Szenarien kann auf unterschiedliche Arten und Weisen geschehen. So ist es möglich, dass das Verhalten von jedem einzelnen Akteur detailliert beschrieben wird, sodass Folgeszenen zwischen Anfang und Ende entstehen. Andererseits kann ein gewisser Raum an möglichen

¹⁶ Ulbrich, S. et al.: Defining and Substantiating the Terms Scene, Situation, and Scenario for AD (2015). a: S. 2; b: S. 6

Aktionen vorgegeben werden und sich auf das Vorgeben von Zielpunkten für einzelne Akteure beschränkt werden. In diesem Fall gäbe es damit nur eine Anfangs- und eine Endszene.

Welcher Ansatz zur Szenariobeschreibung gewählt wird, hängt stark von dem Testziel ab. Daher wird in folgenden Kapiteln näher auf das Testobjekt, die Verhaltens- und Trajektorienplanung, eingegangen, um eine begründete Entscheidung bezüglich des gewählten Ansatzes zu treffen.

Szene

Da sich bei der Klärung der Begrifflichkeit eines Szenarios auf die Definition von Ulbrich et al. konzentriert wurde, wird auch hier dessen Definition der Szene genutzt:

„Eine Szene beschreibt einen Augenblick der Umgebung inklusive der Szenerie und den dynamischen Elementen, sowie die Selbstrepräsentation der Akteure und Beobachter und den Zusammenhang zwischen diesen Entitäten. Nur eine Szenenrepräsentation in einer Simulationsumgebung kann sämtliche Informationen enthalten (objektive Szene, Grundwahrheit). In einer realen Umgebung ist diese inkorrekt, unvollständig, unsicher und aus der Sicht eines Beobachters.“¹⁷

Eine Szene besteht wie Abbildung 2-1 illustriert aus drei Komponenten. Dies sind die Szenerie, dynamische Elemente und die Selbstrepräsentation. Dynamische Elemente sind Elemente, deren geografische Position durch eigenen Antrieb oder durch externe Einflüsse veränderbar sind. Die Selbstrepräsentation gibt Auskunft über den aktuellen Zustand eines Elements. Des Weiteren enthält die Selbstrepräsentation Informationen über die Fähigkeiten und Möglichkeiten von Verkehrsteilnehmern.

Szenerie

Zhang et al. haben in ihrer Definition der Szenerie alle Elemente berücksichtigt, die nicht in der Lage sind, ihre geographische Position selbstständig zu verändern¹⁸. Ein Ziel dieser Definition besteht darin, eine klare Abgrenzung zwischen dynamischen und statischen Elementen innerhalb einer Szene vorzunehmen. Auch die Definition nach Geyer berücksichtigt diese Differenzierung, führt dann aber die Definition durch Beispiele weiter aus, ohne dass die Aufzählung Anspruch auf Vollständigkeit besitzt. Laut Geyer ist die Szenerie eine

„strukturierte Sammlung einzelner statischer Elemente, die den Rahmen einer Szene bilden. Zu den Szenerieelementen zählen beispielsweise Straßentypen und -geometrien, Verkehrszeichen oder Fußgängerüberwege“¹⁹.

2.1.2 Darstellung verschiedener Formen von Szenarien

Szenarien werden bei der Entwicklung von automatisierten Fahrfunktionen in verschiedenen Stadien genutzt. Die Entwicklung von automatisierten Fahrfunktionen hat sich dabei in der Vergangenheit

¹⁷ Ulbrich, S. et al.: Defining and Substantiating the Terms Scene, Situation, and Scenario for AD (2015).

¹⁸ Zhang, X. et al.: Scenario Description Language for Automated Driving Systems: A Two Level Abstraction Approach (2020).

¹⁹ Geyer, S.: Diss., Manöverbasierte Fahrzeugführung (2013).

stark an der Norm ISO 26262 ausgerichtet. Diese beschreibt den Prozess, der notwendig ist, um die funktionale Sicherheit von E/E-System in Serienfahrzeugen zu gewährleisten. Der Prozess orientiert sich an dem Vorgehen im Rahmen von Systems Engineering Prozessen.²⁰

Das bedeutet, dass in einer Konzeptphase Anforderungen an das System gestellt werden, bevor das System in Teilsysteme unterteilt wird. Diese Teilsysteme werden anschließend ausdetailliert und technisch entwickelt. Im Anschluss an die technische Entwicklung folgen Tests auf Teilsystem- oder Modulebene. Daraufhin werden die Teilsysteme integriert und es werden Tests auf einer Gesamtsystemebene durchgeführt. Innerhalb dieser einzelnen Schritte werden unterschiedliche Typen von Szenarien verwendet wie in Abbildung 2-3 dargestellt.

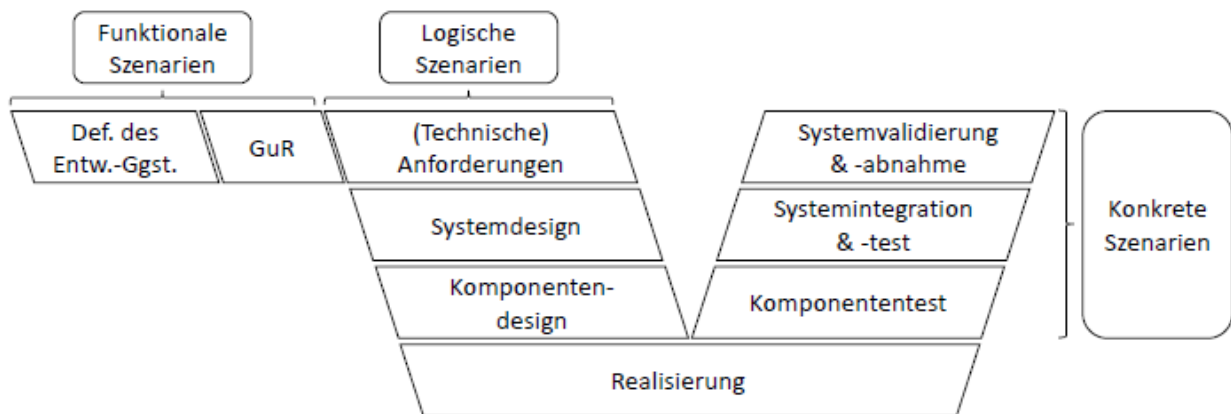


Abbildung 2-3: Nutzung verschiedener Typen von Szenarien im Entwicklungsprozess ^{21a}

Diese drei Typen von Szenarien unterscheiden sich insbesondere in Bezug auf ihren Abstraktionsgrad. Hieraus resultiert ein Unterschied in der Anzahl der Szenarien, der durch die Parametervariation entsteht, die mit einer Konkretisierung verbunden ist.

Funktionale Szenarien

Funktionale Szenarien werden auf eine semantische Art und Weise beschrieben. Das ermöglicht es, bereits früh im Entwicklungsprozess ohne genaue technische Vorstellungen, den zu entwickelnden Gegenstand zu definieren. Für den Aufbau von funktionalen Szenarien wird die Definition von Bagschik et al. genutzt:

„Funktionale Szenarien stellen Betriebsszenarien des Entwicklungsgegenstands auf semantischer Ebene dar. Die Entitäten und Beziehungen zwischen den Entitäten der Anwendungsdomäne werden in sprachlich gefassten Szenarien ausgedrückt. Die Szenarien sind widerspruchsfrei. Das Vokabular der funktionalen Szenarien ist spezifisch für den Anwendungsfall und die -domäne und kann unterschiedliche Detailgrade aufweisen.“^{21b}

²⁰ ISO: ISO 26262 Road vehicles — Functional safety (2011).

²¹ Bagschik, G. et al.: Szenarien für Entwicklung, Absicherung und Test von automatisierten Fahrzeugen (2017). a: S. 8; b: S. 11

Diese Definition betont, dass funktionale Szenarien für den jeweiligen Anwendungsfall individualisiert werden. So werden nur Entitäten eingeführt, die eine Relevanz für das zu entwickelnde Objekt haben, um zu verhindern, dass eine zu hohe Anzahl an Szenarienausprägungen bereits früh im Entwicklungsprozess entsteht. Dies ist gerade auch in Bezug auf das Testen von Modulen des automatisierten Fahrens von großer Bedeutung.

Logische Szenarien

Auf einer weniger abstrakten Ebene befinden sich logische Szenarien. Szenarien auf dieser Ebene werden insofern konkretisiert beziehungsweise detailliert, dass für die semantisch beschriebenen Entitäten reale Umsetzungsmöglichkeiten geschaffen werden. Bagschik et al. definieren logische Szenarien wie folgt:

„Logische Szenarien stellen Betriebsszenarien durch Entitäten und Beziehungen dieser Entitäten mithilfe von Parameterbereichen im Zustandsraum dar. Für die einzelnen Parameterbereiche können optional statistische Verteilungen angegeben werden. Zusätzlich können optional die Beziehungen der Parameterbereiche zueinander mithilfe von Korrelationen oder numerischen Bedingungen modelliert werden. Logische Szenarien enthalten eine formale Beschreibung von Szenarien.“²²

Der Unterschied beziehungsweise die Übersetzung von einem funktionalen zu einem logischen Szenario lässt sich anhand von Tabelle 2-1 demonstrieren. So wird die Entität der Autobahn durch die Anzahl der Fahrstreifen, die Kurvenkrümmung und die Anzahl an Fahrstreifen weiter spezifiziert und in die reale Welt übersetzt. Zudem werden für die einzelnen Parameter Wertebereiche erstellt, die für das Szenario zulässig sind. Eine große Herausforderung in diesem Schritt besteht darin, dass verschiedene Parameter unter Umständen miteinander verbunden sind. Dies wird auch bei der Szenarioerstellung berücksichtigt.

Tabelle 2-1: Ausprägungen drei verschiedener Szenarioarten²³

Abstraktionsebene	Beispielhafte Beschreibung
Funktionale Szenarien	Autobahn mit drei Fahrstreifen und einer geraden Geometrie
Logische Szenarien	Straßentyp [Autobahn], Anzahl an Fahrstreifen [3], Fahrstreifenbreite [3.5 m – 4.5 m], Kurvenkrümmung [0°-5°]
Konkrete Szenarien	Straßentyp [Autobahn], Anzahl an Fahrstreifen [3], Fahrstreifenbreite [4.0 m], Kurvenkrümmung [0°]

Diese Art von Szenarien wird im Entwicklungsprozess dazu genutzt technische Anforderungen an das Fahrzeug beziehungsweise unterschiedliche Fahrzeugfunktionen zu generieren. Diese

²² Bagschik, G. et al.: Szenarien für Entwicklung, Absicherung und Test von automatisierten Fahrzeugen (2017).

²³ Zhang, X. et al.: Scenario Description Language for Automated Driving Systems: A Two Level Abstraction Approach (2020).

Möglichkeit wird dadurch geschaffen, dass auf Basis dieses Parameterraums Belastungen abgeleitet werden, die technische Anforderungen repräsentieren.

Konkrete Szenarien

Für konkrete Szenarien wird folgende, eigene Definition eingeführt, die auf den Überlegungen von Bagschik et al. basiert²⁴:

Konkrete Szenarien leiten sich aus logischen Szenarien in der Art ab, dass für jeden Parameter eindeutige Werte eingesetzt werden. Dabei ist es notwendig, dass die Beziehungen zwischen einzelnen Parametern bei dem Einsetzen von Werten berücksichtigt werden.

Die Ableitung von konkreten Szenarien erfolgt auf Basis einer Diskretisierung des Parameterraums, der im Rahmen von logischen Szenarien geschaffen werden. Diese Diskretisierung und die Eindämmung der damit entstehenden Anzahl an Kombinationen ist eine der großen Herausforderungen. Die Anzahl an Kombinationen lässt sich beispielsweise durch das Bilden von Äquivalenzklassen oder Grenzwertanalysen reduzieren.²⁵

Diese Art des Szenarios wird als Grundlage für das Abtesten von Anforderungen genutzt. Konkrete Szenarien können, wie in Abbildung 2-3 dargestellt, den Inhalt von Testfällen auf allen Systemebenen repräsentieren. Sie sind jedoch nicht vollständig mit Testfällen gleichzusetzen, wie in Kapitel 2.2 erläutert wird. Durch konkrete Testfälle wird eine eindeutige Umgebung für das zu testende Modul geschaffen. Innerhalb dieser Umgebung wird das Verhalten des Testobjekts beobachtet und analysiert.

2.2 Ansätze zur Generierung von Szenarien

Bisher wurden Szenarien und verschiedene Arten von Szenarien größtenteils allgemein beschrieben. Im folgenden Unterkapitel geht es darum zu beschreiben, wie Szenarien speziell für Anwendungsfälle im Bereich des automatisierten Fahrens generiert werden. Dazu wird zwischen vier Arten von Generierung unterschieden. Dies sind die ontologiebasierte Szenariogenerierung, die risikobasierte Szenariogenerierung, die informationsbasierte Szenariogenerierung und die anforderungsbasierte Szenariogenerierung.

2.2.1 Ontologiebasierte Szenariogenerierung

Eine Ontologie spezifiziert ein Konzept durch einen Prozess der Formalisierung. Ein Konzept wiederum ist dadurch aufgebaut, dass eine Simplifizierung und Generalisierung der Welt für einen bestimmten Zweck durchgeführt wird²⁶. Um diese Formalisierung durchführen zu können, beschreiben Hierarchien Klassen von Objekten. Außerdem werden die Beziehungen zwischen Objekten

²⁴ Bagschik, G. et al.: Szenarien für Entwicklung, Absicherung und Test von automatisierten Fahrzeugen (2017).

²⁵ Schuldt, F.: Diss., Methodisches Testen von automatisierten Fahrfunktionen mit Hilfe von virtuellen Umgebungen (2017), S. 121.

²⁶ Genesereth, M. R.: Logical Foundations of Artificial Intelligence (2012).

semantisch festgehalten. Axiome spezifizieren das Gesamtkonzept und die darin vorhandenen Limitierungen²⁷.

In der Vergangenheit wurden ontologiebasierte Konzepte zur Szenengenerierung und auch zur Szenariogenerierung entwickelt. Eines der grundlegenden Modelle wurde dabei von Schuldt entwickelt²⁸. Hier wird ein 4-Ebenen-Modell entwickelt, das anschließend zur systematischen Testfallableitung genutzt wird. Dessen Konzept wird allgemein für automatisierte Fahrfunktionen entwickelt und besitzt keinen speziellen Funktionsfokus. Abbildung 2-4 stellt die vier Ebenen des entwickelten Konzepts dar.

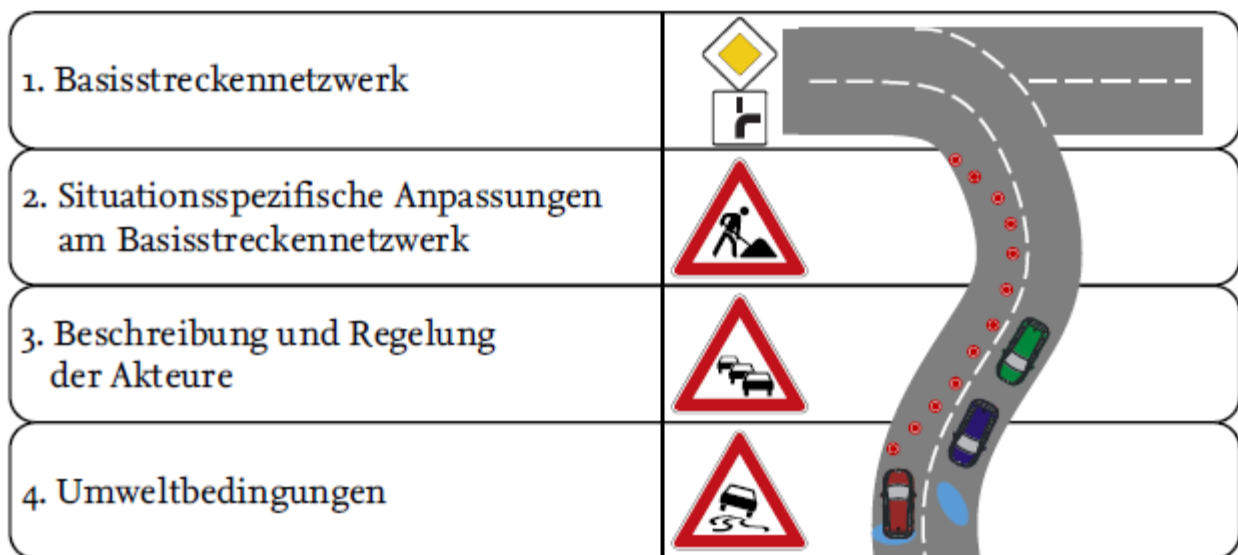


Abbildung 2-4: 4-Ebenen Modell²⁸

Dabei wird in der ersten Ebene das Straßennetzwerk aufgebaut. Um das durchzuführen, wird sich an den Richtlinien der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen orientiert. Es wird sowohl die geometrische als auch die topologische Gestaltung einer Szenerie definiert. Die Geometrie orientiert sich dabei stark an Regelquerschnitten sowie Vorgaben zur Limitierung der Krümmung von Straßen. Anschließend wird gezeigt, dass es auf Basis dieser ersten Ebene auch möglich ist, komplexe Szenarien innerhalb von Kreuzungen zu erstellen.

Auf der der ersten Ebene wird nur die reine Geometrie definiert. Die zweite Ebene berücksichtigt, dass die gleiche Straßengeometrie zu unterschiedlichen Situationen führen kann. Dazu gehören Änderungen in der Straßentopologie, die beispielsweise durch Schlaglöcher entstehen sowie Änderungen in den Verhaltensregeln, die durch Verkehrsschilder oder Verkehrsinfrastruktur wie Lichtsignalanlagen (LSA) repräsentiert werden. Zudem kann die Szenerie durch die umliegende Umgebung verändert werden. Durch das Hinzufügen von Bebauungen, ist es möglich, städtische Szenarien zu repräsentieren.

²⁷ Michael Hülsen et al.: Traffic intersection situation description ontology for advanced driver assistance (2011).

²⁸ Schuldt, F.: Diss., Methodisches Testen von automatisierten Fahrfunktionen mit Hilfe von virtuellen Umgebungen (2017), S. 107.

Die dritte Ebene beschreibt den Übergang von der Szenerie hin zu einer Szene und weiter zu einem Szenario. Das geschieht durch das Hinzufügen von Akteuren. Dies können verschiedene Arten von Verkehrsteilnehmern wie Kraftfahrzeuge oder Fußgänger sein, aber auch Tiere oder Gegenstände. Des Weiteren werden Änderungen von LSA oder Wechselverkehrszeichen auf dieser Ebene modelliert. Diese gehören zwar zur Szenerie, besitzen aber ebenfalls die Fähigkeit, ihren Zustand zu verändern. Die einzelnen Akteure werden auf Basis von Manövern angesteuert.

Die Struktur eines Manövers ist in Abbildung 2-5 dargestellt. Manöver werden nach Erfüllen einer Startbedingung gestartet. Auf Basis dieser Startbedingung führt das dynamische Element dann eine Aktion durch. Die Startbedingungen können eine zeitliche oder örtliche Bedingung darstellen. Alternativ ist es auch möglich, dass Ereignisse durch den Zustand oder das Verhalten eines anderen Akteurs repräsentiert werden. Ein Beispiel liefert Schuldts für den Aufbau einer Zielszene an einer Kreuzung, in der das Verhalten eines Fahrzeugs an das Verhalten eines aus einer anderen Richtung kommenden Fahrzeugs gekoppelt wird. Damit ist es möglich, bei verschiedenem Verhalten eines Akteurs, dieselbe Zielszene zu erreichen.

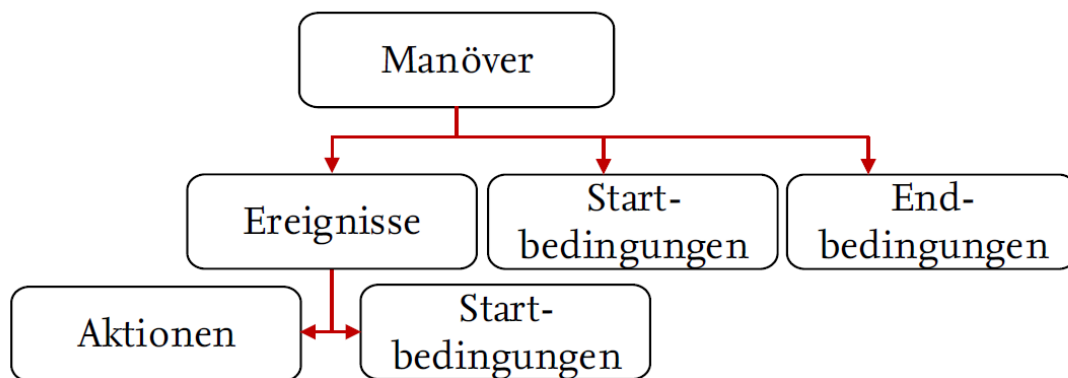


Abbildung 2-5: Aufbau eines Manövers²⁹

Die vierte Ebene beschreibt die Umwelt, in der sich das Szenario befindet. Dazu gehört, dass das Wetter und die Tageszeit variiert werden können. Zudem ist es möglich, dass die Struktur von Manövern auch auf Umweltbedingungen angewendet wird, um Veränderungen der Umweltbedingungen zu simulieren.²⁹

Bagschik et al. haben dieses Modell von Schuldts weiterentwickelt, indem eine weitere Ebene hinzukommt. Bagschik unterteilt das Erstellen der Szenerie in drei Ebenen, wobei die erste Ebene dieselbe Struktur wie die von Schuldts aufweist. Auf der zweiten Ebene werden jedoch dann nicht die Verkehrsinfrastruktur und Verkehrsschilder direkt aufgebaut, sondern es wird ein hierarchisches System für die Repräsentation von Verkehrsregeln aufgebaut. Diese besitzen dann wiederum Instanzen in Form von Verkehrsschildern oder Verkehrsinfrastruktur. Auf der dritten Ebene der Szenerie werden anschließend nur noch temporäre Veränderungen der Szenerie dargestellt.³⁰

²⁹ Schuldts, F.: Diss., Methodisches Testen von automatisierten Fahrfunktionen mit Hilfe von virtuellen Umgebungen (2017), S. 113.

³⁰ Bagschik, G. et al.: Ontology based Scene Creation for the Development of Automated Vehicles (2018).

Bock et al. hat dieses Modell um die Ebene des digitalen Informationsaustauschs ergänzt. Zu diesen Informationen gehören digitale Karteninformationen sowie die Kommunikation des Fahrzeugs mit anderen Informationsquellen. Dies wird unter dem Begriff Vehicle-to-X zusammengefasst.³¹

2.2.2 Risikobasierte Szenariogenerierung

Das Hauptziel der Szenariogenerierung im Rahmen des automatisierten Fahrens besteht darin, dass eine bestimmte Funktion oder ein bestimmtes System durch Testfälle innerhalb dieser Szenarien abgesichert wird. Hierbei besteht ein Ansatz darin, die Risikofaktoren des Testobjekts zu identifizieren und konkret Szenarien zu generieren, die diese Risiken repräsentieren. Falls das Testobjekt in der Lage ist, in diesen besonders komplexen und risikobehafteten Situationen zu bestehen, gilt es als abgesichert.

Klischat et al. testen die Bewegungsplanung eines automatisierten Fahrzeugs durch das Abprüfen des Verhaltens in besonders komplexen Szenarien. Dazu werden verschiedene Kritikalitätskriterien aufgestellt, auf deren Basis dann in ausgewählten Szenarien Szenarien generiert werden. Dabei determiniert der verfügbare beziehungsweise befahrbare Raum einer Szenerie die Schwierigkeit eines Szenarios. Auf Basis von evolutionären Algorithmen werden solche besonders kritischen Szenarien identifiziert.³²

Ein weiterer Ansatz besteht darin, Unfälle beziehungsweise ihre Ursache zu analysieren und darauf aufbauend Szenarien zu generieren. So führen Junietz et al. ein Bewertungskonzept ein, das durch zwei Hauptmetriken kritische Szenarien identifiziert. Diese sind zum einen die Reserve, die besteht, bis es zu einer Kollision kommt und zum anderen die Menge an Möglichkeiten, solch eine Kollision zu vermeiden. Die Reserve wird durch die mögliche Reaktionszeit und die fahrdynamischen Limitierungen gekennzeichnet. Die Korrekturmöglichkeiten werden durch die Korrekturzeit bestimmt, die bei einem Ausrichtungsfehler der Trajektorie vorhanden ist, sowie durch die Größe der notwendigen Korrektur. Dieser Ansatz bietet auch einen Vorteil gegenüber üblichen Kriterien wie der Time-to-Collision, da es nicht notwendig ist, die Bewegungen des anderen Objekts zu präzisieren.³³

Des Weiteren ist es möglich, auf Basis von Unfalldatenbanken Szenarien zu generieren. Hier wird zwischen Unfällen, die aufgrund von menschlichem Versagen entstehen und Unfällen, die aufgrund von besonders herausfordernden Situationen entstehen, differenziert. Eine alleinige Betrachtung von Unfalldatenbanken würde allerdings nur unter der Annahme funktionieren, dass Kritikalitätskriterien für menschliche Fahrer und automatisierte Fahrzeuge übereinstimmen. Diese Annahme ist jedoch nicht zulässig. Daher ist es notwendig, weitere Quellen für die Szenariogenerierung zu nutzen.³⁴

³¹ Bock, J. et al.: Data basis for scenario-based validation of HAD on highways (2018).

³² Klischat, M.; Althoff, M.: Generating Critical Test Scenarios for Automated Vehicles with Evolutionary Algorithms (2019).

³³ Junietz, P. et al.: Metrik zur Bewertung der Kritikalität von Verkehrssituationen und -szenarien (2017).

³⁴ Pfeffer, R.: Absicherung hochautomatisierter Fahrfunktionen durch Nutzung von Realdaten (2020).

2.2.3 Informationsbasierte Szenariogenerierung

Die informationsbasierte Szenariogenerierung wird im Wesentlichen durch zwei Informationsquellen beeinflusst. Expertenwissen stellt die erste Quelle dar, während die Nutzung von Daten als zweite Informationsquelle dient.

Dabei werden die expertenbasierten Szenarien in der Regel wiederum in Ontologien dargestellt. Hier wird insbesondere das aufgebaute Wissen von Experten in den jeweiligen Funktionsbereichen genutzt und dieses formalisiert. An dieser Stelle wird nicht weiter auf diese Form der Informationsquelle weiter eingegangen, da sie in 2.2.1 bereits genauer erläutert wurde. Zudem werden durch die Nutzung von Daten aus dem Realverkehr Szenarien generiert. Diese Form der Szenariogenerierung ermöglicht es, Szenarien anhand von Sensordaten aus dem Realverkehr zu simulieren. Dadurch ist es möglich, beispielsweise auch Schnittstellen zwischen verschiedenen Modulen wie der Trajektorienplanung und der Sensorik zu überprüfen.

Eine durch das Unternehmen dSpace genutzte Variante besteht darin, dass reale Fahrzeuge am Straßenverkehr teilnehmen und durch verschiedene Formen von Sensoren Daten aufnehmen. Diese Fahrten werden anschließend abstrahiert und in logische Szenarien übersetzt. Im Anschluss daran werden diese Szenarien dann wiederum parametrisiert. Diese Parametrisierung erfolgt auf Basis einer Relevanzbewertung und vermindert daher das Problem, dass im Realverkehr zu viele inhaltsgleiche Szenarien getestet werden. Mithilfe dieser Daten ist es möglich, die Szenarien aus dem Realverkehr in einer Simulationsumgebung zu nutzen.³⁵

Ein Vorteil dieses Ansatzes besteht des Weiteren darin, dass es durch die Anwendung von künstlicher Intelligenz möglich ist, Szenarien zu erkennen, die nicht durch bereits vorhandenes Wissen generiert werden.

Das Projekt PEGASUS beschäftigte sich mit der Entwicklung von Absicherungsstandards von automatisierten Fahrfunktionen auf der Autobahn. Hierzu gehörte auch der Aufbau von szenariobasierten Testfällen. Im Rahmen des Projekts wurden beide Informationsquellen genutzt, um systematisch Szenarien zu generieren. Dabei wurde das 6-Ebenenmodell nach Bock verwendet, um logische Szenarien zu generieren. Daneben wurden verschiedene Datenquellen wie Simulatordaten und Feldversuche genutzt, anhand derer Szenarien parametrisiert wurden. Hierdurch war es anschließend möglich, kritische Parameterräume zu identifizieren.³⁶

2.2.4 Anforderungsbasierte Szenariogenerierung

Dieser Ansatz resultiert aus dem allgemeinen Vorgehen, automatisierte Fahrzeuge und automatisierte Fahrfunktionen nach Systems Engineering Grundsätzen zu entwickeln. Dabei werden auf jeder Systemebene Anforderungen an die jeweilige Ebene entwickelt. Abbildung 2-6 zeigt wie so ein Prozess

³⁵ understand.ai: Extraction of real-world driving data in simulations.

³⁶ PEGASUS et al.: PEGASUS METHOD (2019).

aussehen könnte. Dabei findet auf den Subsystemebenen eine Verifizierung statt, bevor es auf Gesamtebene zu einer Validierung kommt.

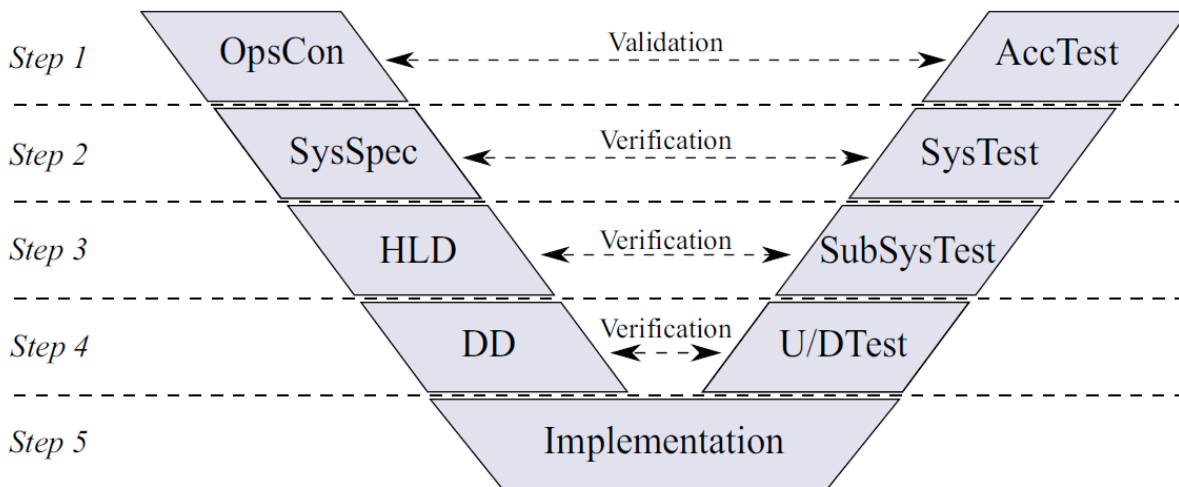


Abbildung 2-6: Entwicklung automatisierter Fahrzeuge nach Systems Engineering Grundsätzen^{37a}

Nach einer Deduktion der Anforderungen werden notwendige Fähigkeiten des automatisierten Fahrzeugs definiert. Eine Fähigkeit wird von Sippl et al. dabei so definiert, dass sie ein bestimmtes Zielverhalten in einer bestimmten Szenerie repräsentiert. Anschließend bilden Sippl et al. Fähigkeitsmatrizen in denen verschiedene Manöver beziehungsweise Verhalten unterschiedlichen Szenerien gegenüberstehen. Durch den Aufbau von Use Cases wird die Anzahl an relevanten Szenerien eingegrenzt. Gleichzeitig werden alle möglichen Manöver innerhalb dieser Szenerien getestet. Das führt dazu, dass diese Szenarien „Mutually Exclusive“ (ME) und „Collectively Exhaustive“ (CE) sind. Das bedeutet, dass eine Vollständigkeit gewährleistet ist, während sich die einzelnen Szenarien in ihren Inhalten nicht überschneiden, sodass das Potenzial besteht, den Gesamtabwicklungsaufwand zu reduzieren. Ein weiterer Vorteil dieses Ansatzes besteht in der Nachvollziehbarkeit der Beziehungen zwischen einzelnen Anforderungen und den dazugehörigen Testfällen.^{37b}

Im Rahmen der funktionalen Dekomposition von Amersbach et al. werden weitere Überlegungen zur Szenariogenerierung angestellt. Durch diesen Ansatz wird das automatisierte Fahren in Funktionsebenen unterteilt wie in Abbildung 2-7 dargestellt. Das hat zur Folge, dass für jede Ebene Szenarien erstellt werden, wobei nur die für die jeweilige Ebene relevanten Parameter variiert werden. Dies verhindert ein zu großes Anwachsen der Anzahl an Parametern, die bei Tests auf Gesamtfunktionsebene entstehen. Beispielsweise sind Umweltbedingungen insbesondere auf den Ebenen vom Informationszugang bis zur Informationsverarbeitung relevant. Auf anderen Ebenen sind diese Faktoren aber weniger relevant und werden daher nicht mehr berücksichtigt. Amersbach et al. weisen nach, dass es mit ihrem Ansatz möglich ist, die Anzahl der Testfälle um den Faktor 20 bis 130 zu reduzieren.³⁸

³⁷ C. Sippl et al.: Scenario-Based Systems Engineering for AD Functions (2019). a: S. 3; b: S. 4

³⁸ Amersbach, C.; Winner, H.: Funktionale Dekomposition im Rahmen des automatisierten Fahrens (2018).

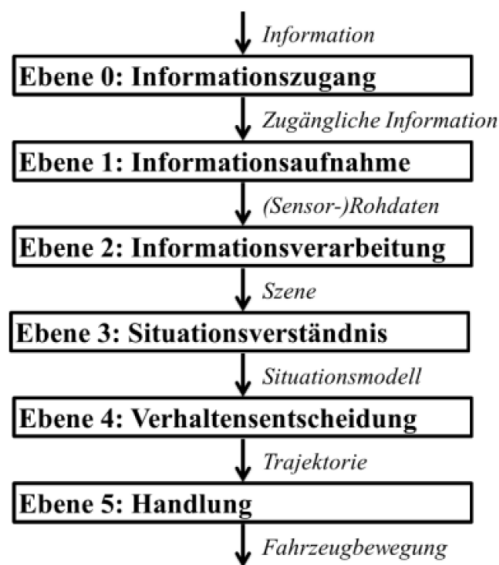


Abbildung 2-7: Funktionale Dekomponierung³⁹

2.3 Aufbau eines Testkonzepts

Die Bewertung eines Testobjekts beinhaltet mehr als die Generierung funktionaler Szenarien, die durch eine Parametrisierung in konkrete Szenarien übersetzt werden. Dafür ist ein umfassendes Testkonzept notwendig. Dieses unterteilt sich laut Schuldt et al. in vier Schritte, die in Abbildung 2-8 dargestellt sind. Nach einer Analyse des Testobjekts werden Testfälle generiert und durchgeführt bevor es zu einer Auswertung dieser Testfälle kommt. Diese einzelnen Schritte werden im Folgenden genauer analysiert.⁴⁰

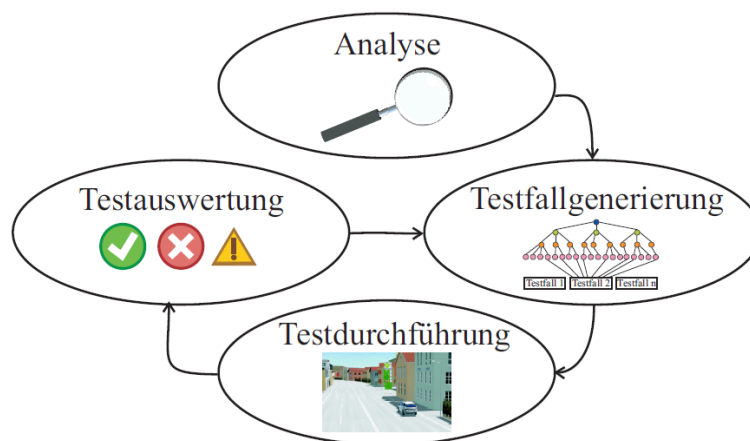


Abbildung 2-8: Aufbau eines Testkonzepts⁴⁰

³⁹ Amersbach, C.; Winner, H.: Funktionale Dekomposition im Rahmen des automatisierten Fahrens (2018).

⁴⁰ Schuldt, F. et al.: Effiziente systematische Testgenerierung für Fahrerassistenzsysteme in virtuellen Umgebungen (2013).

2.3.1 Analyse

Grundlage für eine effiziente und effektive Testfallgenerierung ist die Analyse des Testobjekts. Diese stellt sicher, dass anschließend eine zielgerichtete Testfallgenerierung stattfindet. Diese Objektanalyse findet frühzeitig während des Entwicklungsprozesses statt⁴¹.

Im Rahmen dieser Analyse werden die Grenzen des (Sub-)Systems klar definiert. Das bedeutet, dass die Art und Form der Systemeingänge und -ausgänge bestimmt wird. Damit geht einher, dass die Ergebnisse, die das System erzeugt, und deren Zielort festgelegt werden. Das ermöglicht es, bereits früh in der Entwicklung des Testkonzepts, Einflussfaktoren des Systems zu identifizieren. Zu dieser Phase gehört auch, dass Randbedingungen für das System festgelegt werden. Diese können sich durch technische Limitierungen oder durch Gesetze und Normen ergeben.⁴²

Während der Testobjektanalyse werden auch Anforderungen an das Testobjekt abgeleitet. Dafür ist es notwendig, ein Verständnis davon zu entwickeln, wie eine Anforderung aufgebaut ist beziehungsweise was eine Anforderung beinhaltet. Ein wesentlicher Grundsatz von Anforderungen besteht darin, dass deren Erfüllung überprüfbar ist. Das Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) definiert eine Anforderung als:

„(1) Eine Bedingung oder Fähigkeit, die durch einen Nutzer benötigt wird, um ein Problem zu lösen oder ein Ziel zu erreichen.

(2) Eine Bedingung oder Fähigkeit, die durch ein System oder Subsystem erfüllt werden muss, um einen Vertrag, einen Standard, eine Spezifikation oder andere formale Dokumente einzuhalten.

(3) Eine dokumentierte Repräsentation einer Bedingung oder Fähigkeit wie in (1) oder (2).“⁴³

Anforderungen zu identifizieren ist eine wesentliche Herausforderung, die durch die Nutzung verschiedener Informationsquellen bewältigt wird. Dazu gehören Techniken wie Experteninterviews, Fragebögen oder die Nutzung von Prototypen⁴⁴. Es ist außerdem möglich, über die Nutzung logischer Szenarien Anforderungen abzuleiten wie in Kapitel 2.1.2 dargestellt.

Nach den Grundprinzipien des Systems Engineering werden Anforderungen auf zwei Arten genutzt. Zum einen werden Anforderungen verwendet, um daraus Testfallkriterien abzuleiten. Damit wird die Berücksichtigung von Anforderungen im Entwicklungsprozess sichergestellt. Zum anderen werden Anforderungen im Rahmen der szenariobasierten Testfallerzeugung verwendet. Hierbei werden, wie in Kapitel 2.2.4 dargestellt, Anforderungen als Orientierungspunkt für die Erzeugung von Szenarien verwendet.

⁴¹ Winner, H.; Wachenfeld, W.: Die Freigabe des autonomen Fahrens, S. 447.

⁴² Martin Glinz: Software Engineering – Eine Einführung (2005).

⁴³ IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology (1990).

⁴⁴ Martin Glinz: Software Engineering – Eine Einführung (2005).

2.3.2 Testfallgenerierung

Um Testfälle zu generieren, ist es notwendig, ein Verständnis darüber zu erlangen, wie Testfälle aufgebaut sind. Im Anschluss daran werden Möglichkeiten dargestellt, um die Anzahl der generierten Testfälle zu limitieren.

Nach Steimle et al. besteht ein (konkreter) Testfall aus einer Testspezifikation, einem konkreten Szenario und einem konkreten Bewertungskriterium⁴⁵. Diese Definition ist speziell für das szenarienbasierte Testen entwickelt worden. Der gesamte Aufbau ist Abbildung 2-9 dargestellt.

Ein konkretes Szenario stellt dabei ein Szenario dar, das einen geringen Abstraktionsgrad besitzt. Alle Parameter innerhalb dieses Szenarios haben einen festen Wert zugewiesen bekommen. Das bedeutet, dass einzelne Szenen definiert sind und somit auch die Bewegungen der verschiedenen Akteure. Allerdings existieren selbst bei konkreten Szenarien noch Unterschiede darin, bis zu welchem Zeitpunkt sämtliche Aktionen definiert sind. So ist es denkbar, dass die Startszene eines Szenarios definiert wird, ohne dass die genauen Bewegungen der Akteure im Anschluss daran festgelegt sind. Aufgrund der Parametrisierung stellt dies allerdings trotzdem ein konkretes Szenario dar. Gerade bei dem Test der Verhaltens- und Trajektorienplanung ist es nicht immer möglich, alle Aktionen von einer Anfangs- bis zu einer Endszene zu definieren.

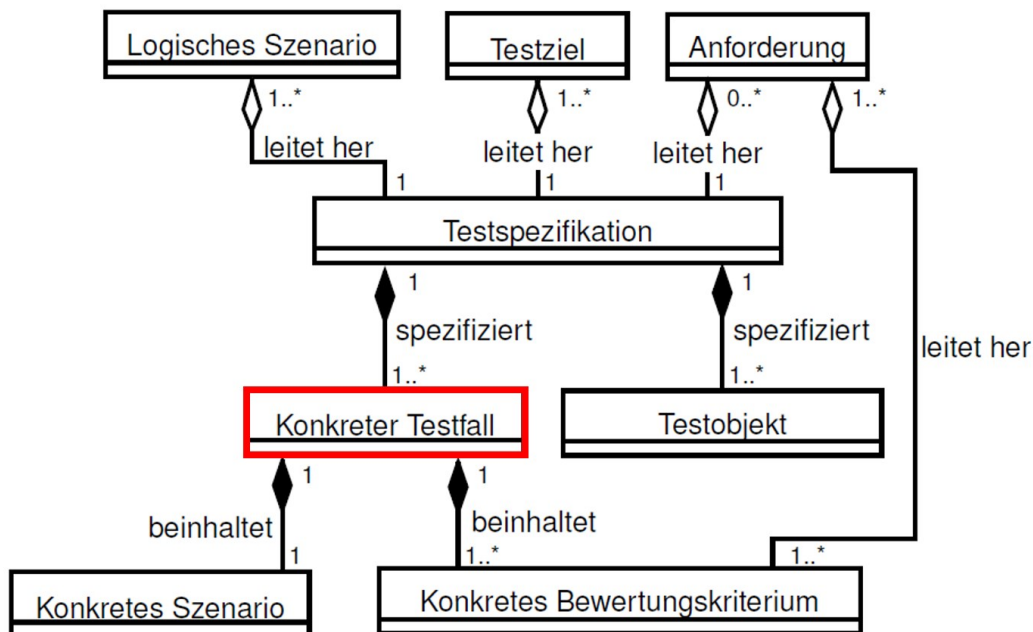


Abbildung 2-9: Bestandteile eines Testfalls⁴⁵

Ein konkretes Bewertungskriterium beinhaltet einen Bewertungsparameter, nachdem das Abschneiden innerhalb eines Szenarios evaluiert wird. Dies ist wichtig, um das Abschneiden des Testobjekts zu quantifizieren und um anschließend zu bewerten, ob der Testfall bestanden wurde.

⁴⁵ Steimle, M. et al.: Grundvokabular für den szenarienbasierten Testansatz automatisierter Fahrfunktionen (2018).

Die Testspezifikation beschreibt sowohl die konkreten Testfälle als auch das Testobjekt. Zudem wird auf die verschiedenen Komponenten eingegangen, die als Basis für Testfälle dienen. Dazu gehören logische Szenarien, das Testziel und die bereits identifizierten Anforderungen. Logische Szenarien leiten sich dabei aus funktionalen Szenarien ab, die frühzeitig im Entwicklungsprozess definiert wurden. Das Testziel besteht laut Hartmann darin, Fehler beziehungsweise Unzulänglichkeiten des Testobjekts zu erkennen⁴⁶. Im Vergleich zu Anforderungen besteht das Wesen eines Testziels darin, dass dieses auf einer deutlich abstrakteren Ebene definiert, was durch den Test erreicht werden soll. Dies lässt sich an einem Beispiel veranschaulichen: So legt Spillner für verschiedene Systemebenen Testziele fest. Dabei sollen bei einem Integrationstest Schnittstellenfehler identifiziert werden⁴⁷. Innerhalb dieses Rahmens werden dann durch genaue Anforderungen die Interaktionen verschiedener Schnittstellen miteinander festgelegt.

In Kapitel 2 wurde auf die verschiedenen Möglichkeiten zur Szenariogenerierung eingegangen. Daher werden diese Möglichkeiten hier nicht weiter erörtert. Vielmehr geht es hier darum, wie Testfälle effizient abgeleitet werden und welche Techniken dafür existieren. Bei der Testfallableitung geht es hierbei um die Ableitung konkreter Szenarien aus logischen Szenarien.

Winner et al. beschreiben Techniken von Glauner und Eckstein⁴⁸. Ihre Überlegungen basieren darauf, dass Testfälle geringerer Kritikalität durch Testfälle höherer Kritikalität abgedeckt werden. Dafür werden Bewertungsmaßstäbe eingeführt, um Testfälle hinsichtlich ihres Schwierigkeitsgrads einzuordnen. Allerdings wurden diese Entwicklungen zu einem vollständigen Bewertungsmaßstab nicht abgeschlossen.^{49,50}

Einen weiteren Ansatz zur Reduzierung der notwendigen Testfälle hat Schuldt entwickelt. Er betrachtet hierzu drei verschiedene Möglichkeiten zur Testfallableitung: die Bildung von Äquivalenzklassen, die Nutzung von Grenzwertanalysen und Verfahren der kombinatorischen Testfallableitung. Die Bildung von Äquivalenzklassen zielt darauf ab, dass bestimmte Parameterbereiche eines Parameters als gleichwertig erachtet werden. Die Gleichwertigkeit kann sich dabei auf die funktionalen Auswirkungen einer Parametervariation beziehen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, durch weitere Informationsquellen, wie von Schuldt durchgeführt, eine Gruppierung von gleichwertigen Diskretisierungsstufen durchzuführen und so eine Limitierung der Anzahl an Testfällen zu erreichen. Grenzwertanalysen verfolgen dieselbe Strategie wie Äquivalenzklassenbildungen mit dem Unterschied, dass Randwerte aus einer Klasse von Parametern genutzt werden, um diese darzustellen. Im Gegensatz dazu werden bei der Äquivalenzklassenbildung zufällige Werte genommen. Eine andere Alternative zur Ableitung von Testfällen existiert in der Nutzung von Kombinatoriktechniken. Dabei geht es darum, dass Parameter auf verschiedene Arten und Weisen miteinander kombiniert werden können. So wird beim *each-used* Verfahren jeder Parameter nur innerhalb seiner Diskretisierungsstufen

⁴⁶ Hartmann, N.: Automation des Tests eingebetteter Systeme am Beispiel der Kraftfahrzeugelektronik (2001).

⁴⁷ Spillner, A.: Basiswissen Softwaretest (2012).

⁴⁸ Winner, H.; Wachenfeld, W.: Die Freigabe des autonomen Fahrens, S. 459.

⁴⁹ UNI DAS e.V.: Effiziente Felderprobung von Fahrerassistenzsystemen.

⁵⁰ Eckstein, L.; Zlocki, A.: Safety Potential of ADAS : Combined Methods for an Effective Evaluation.

variiert, ohne währenddessen andere Parameter zu variieren. Das führt dazu, dass viele Fehler im Rahmen eines logischen Szenarios nicht identifiziert werden. Daher gibt es weitere Möglichkeiten, Parameter zu kombinieren. Dazu gehören das paarweise Kombinieren, das *t-wise* Kombinieren und das *N-wise* Kombinieren. Bei der paarweisen Kombinatorik werden immer zwei Parameter miteinander auf jeder Diskretisierungsstufe kombiniert. Die *t-wise* Kombination nutzt dann anstelle von zwei Parametern *t* Parameter als Basis für Kombinationen. Bei der *N-Wise* Kombinatorik wird jede Kombination überprüft und stellt damit sicher, dass sämtliche Fehler entdeckt werden. Allerdings steigt der Aufwand exponentiell mit steigender Anzahl an Paarungen. Dabei ist es nach Kuhn bereits bei mindestens paarweiser kombinatorischer Testfallableitung möglich, 70 % bis 97 % aller Fehler zu entdecken.^{51,52}

Abbildung 2-10 illustriert diese Möglichkeiten der kombinatorischen Testfallableitung.

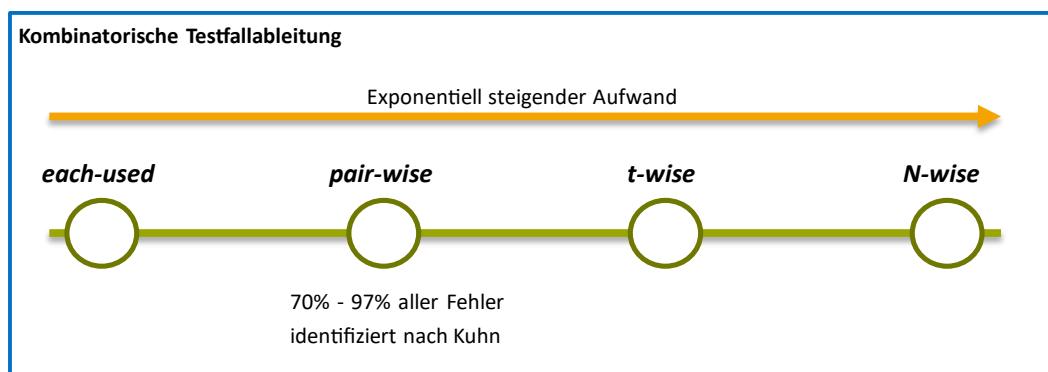


Abbildung 2-10: Verschiedene Möglichkeiten der kombinatorischen Testfallableitung

2.3.3 Testfalldurchführung

Winner et al. unterteilen Testumgebungen in zwei Dimensionen: Repräsentation des Umfelds und Repräsentation des Fahrzeugs. Hierfür existieren jeweils drei Ausprägungen entlang denen sich bewegt wird. Diese sind die reale Repräsentation, die künstliche oder die virtuelle Repräsentation. Entlang dieser einzelnen Kategorien werden die Testumgebungen zugeordnet. Diese Unterteilung wird in Abbildung 2-11 illustriert.⁵³

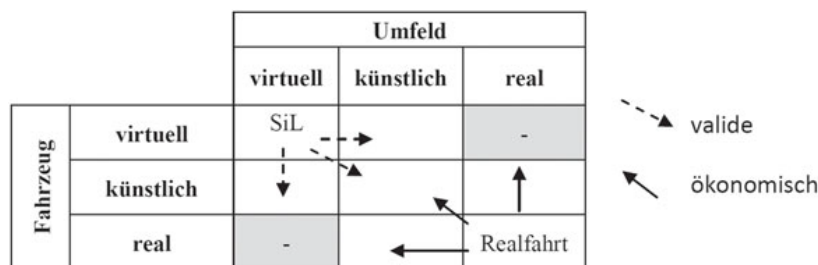


Abbildung 2-11: Ausprägungen der Testfalldurchführung⁵³

⁵¹ Kuhn, D. R. et al.: Software fault interactions and implications for software testing (2004).

⁵² Schuldt, F.: Diss., Methodisches Testen von automatisierten Fahrfunktionen mit Hilfe von virtuellen Umgebungen (2017).

⁵³ Winner, H.; Wachenfeld, W.: Die Freigabe des autonomen Fahrens, S. 460.

Die Realfahrt findet dabei mit einem Testfahrzeug im realen Straßenverkehr statt. Diese Form der Validation nutzt beispielsweise das Unternehmen Waymo, das Software für automatisierte Fahrfunktionen entwickelt. Waymo ist dabei 6,1 Millionen Meilen in einem vollständig automatisierten Testfahrzeug zwischen 2019 und dem 3. Quartal 2020 gefahren⁵⁴. Allerdings sind davon nur 65.000 Meilen ohne Testpiloten gefahren worden, der im Notfall hätte eingreifen können. Eine Validation auf Basis dieser Art des Testens ist schwierig umsetzbar wie in Kapitel 1.2 beschrieben. Der Hauptgrund liegt dabei in der stochastischen Verteilung komplexer Situationen, die im Realverkehr nicht künstlich hervorgerufen werden können und somit in einem abflachenden Validierungsnutzen von zunehmenden Kilometerzahlen resultieren.

Eine Realfahrt in einem künstlichen Gelände entspräche dem Testen eines Fahrzeugs auf einem Prüfgelände. Ein Vorteil dieser Art des Prüfens ist, dass dadurch künstlich komplexe Situationen erzeugt werden können. Durch die kontrollierte Umgebung ist zudem eine Inbetriebnahme von Testfahrzeugen möglich, ohne andere Verkehrsteilnehmer zu gefährden.

Ein künstliches Fahrzeug in einem realen Umfeld entsteht dadurch, dass das Fahrzeug in seiner Leistungsfähigkeit oder Sicherheit gegenüber dem Serienfahrzeug verbessert wird. So überwacht ein ausgebildeter Testpilot die Fahrzeugführung bei Fahrten von Waymo-Fahrzeugen im realen Straßenverkehr. Ein weiteres Beispiel für solch eine gesteigerte Leistungsfähigkeit wäre, dass ein Fahrzeug mit dem Serienfahrzeug überlegener Sensorik ausgestattet wird. Ein virtuelles Umfeld wird beispielsweise durch das Projizieren eines Leinwandbilds erstellt. Dieses wird dann durch Sensoren der Kamera verarbeitet. Damit ist es möglich, ein künstliches Fahrzeug in einem Fahrsimulator auf Rollenprüfständen fahren zu lassen. Diese Kombinationen an virtuellem und künstlichem Umfeld mit einem virtuellen oder künstlichen Fahrer werden als Vehicle-in-the-Loop Tests bezeichnet.⁵⁵

Die Kombination aus virtuellem Umfeld und virtuellem Fahrzeug wird durch Software-in-the-Loop Tests repräsentiert. Dies sind Testfälle, die in einer reinen Simulationsumgebung ablaufen. Dabei wird das Umfeld durch Sensormodelle modelliert, während das Fahrzeug in einer Simulationsumgebung wie IPG Carmaker auf diese virtuellen Daten reagiert. Diese Art von Test wird insbesondere in der frühen Phase des Entwicklungsprozesses genutzt, um kostengünstig mit einer hohen Frequenz Entwicklungsstände zu testen und Fehler zu identifizieren.

2.3.4 Testfallevaluation

Um Testfälle zu evaluieren, ist es notwendig, Testfallkriterien zu bestimmen. Wie in Kapitel 2.3.2 dargestellt, leiten sich Testfallbewertungskriterien aus Anforderungen ab. Dies wird im Folgenden anhand eines Beispiels veranschaulicht. Eine Anforderung lautet beispielsweise: „Das Egofahrzeug darf die Geschwindigkeitsbegrenzung innerhalb eines Fahrstreifens nicht überschreiten“. Als Egofahrzeug wird dabei das Fahrzeug bezeichnet, das in einem Testfall mit dem zu überprüfenden System

⁵⁴ Schwall, M. et al.: Waymo Public Road Safety Performance Data.

⁵⁵ Winner, H.; Wachenfeld, W.: Die Freigabe des autonomen Fahrens, S. 461.

verbunden ist. Das abgeleitete Testfallkriterium in diesem Beispiel wäre die Geschwindigkeit in Verbindung mit einem maximal erlaubten Wert.

Testfallkriterien lassen sich grundsätzlich entlang von zwei Dimensionen unterteilen. Zum einen existieren Kriterien, für die während des gesamten Testfalls Daten erhoben werden. Für die andere Form von Kriterien ist nur das Verhalten des Testobjekts zu einem bestimmten Zeitpunkt, unter einer bestimmten Bedingung oder einer festgelegten Rahmenbedingung entscheiden⁵⁶. Neben diesen Ausprägungen ist es auch möglich, zwischen K.o. Kriterien und sogenannten „weichen“ Kriterien zu unterscheiden. K.o.-Kriterien und „weiche“ Kriterien lassen sich wie folgt definieren:

K.o.-Kriterien bestehen aus einer Bedingung, die immer erfüllt sein muss oder niemals erfüllt sein darf. Bei einer Verletzung des Kriteriums gilt ein Testfall als nicht bestanden.

Weiche Kriterien zeichnen sich dadurch aus, dass durch sie ein Verhalten überprüft wird, ohne dass konkrete Grenzen des Verhaltens festgelegt werden. Zur Bewertung des Kriteriums ist daher eine Evaluierungsfunktion notwendig.

Des Weiteren gibt es auch Kriterien, die einen Rahmen festlegen, in dem sich das Verhalten bewegen darf, es aber gleichzeitig auch Grenzen dieses Verhaltens gibt. Solch ein Kriterium ist beispielsweise durch einen erlaubten Geschwindigkeitskorridor gegeben. Die Höchstgeschwindigkeit darf nicht überschritten werden. Allerdings stellt eine zu niedrige Geschwindigkeit eine Art Verkehrsbehinderung dar oder verletzt möglicherweise eine Mindestgeschwindigkeit. Damit ist es notwendig, auch dieses Fahrverhalten zu bestrafen.

Um ein solches Verhalten bewerten zu können, existieren Qualitätsverlustfunktionen. Diese Funktionen werden individuell nach dem jeweiligen Kriterium gestaltet und angepasst. Sie wurden von Taguchi et al. eingeführt. Bei dieser Reihe an Funktionen wird zwischen symmetrischen und asymmetrischen Verlustfunktionen unterschieden. Darüber hinaus wurden durch Taguchi Maximierungs- und Minimierungsfunktionen eingeführt. Diese Qualitätsverlustfunktionen enthalten einen Zielwert sowie den gemessenen tatsächlichen Wert, den das Testobjekt während eines Testfalls erreicht. Bei einer symmetrischen Verlustfunktion werden negative Abweichungen genauso wie positive Abweichungen bestraft. Eine asymmetrische Verlustfunktion bestraft dagegen die Abweichung in positiver oder negativer Richtung stärker als in die entgegengesetzte Richtung. Eine Minimierungsfunktion bietet sich dagegen an, wenn Abweichungen durch einen Betrag übergeben werden oder nur in eine Richtung existieren. In diesem Fall würde die Qualitätsverlustfunktion nur darauf achten, dass Abweichungen minimiert werden. Genau umgekehrt verhalten sich Maximierungsfunktionen. Hier ist das Ziel, dass der Eingangsmesswert möglichst groß ist. Ein kleinerer Wert resultiert dann in einem größeren Qualitätsverlust. Neben dieser grundsätzlichen Funktionsweise ist zu beachten, dass die Qualitätsverlustfunktionen für einzelne Kriterien genormt werden. Das bedeutet, dass die erlaubte Abweichung in Relation zum maximal erlaubten Qualitätsverlust gesetzt wird. Dieser Wert wird dann

⁵⁶ Steimle, M. et al.: Ein Beitrag zur Terminologie für den szenarienbasierten Testansatz automatisierter Fahrfunktionen (2018).

mit dem Resultat der Qualitätsverlustfunktion multipliziert, um eine Normung und Vergleichbarkeit von Kriterien miteinander zu erreichen.⁵⁷

Schuldt et al. nutzen diese Art von Funktionen in ihrem Testbaukasten. Des Weiteren werden im Rahmen der Evaluierung Mittelwertanalysen genutzt, um die Entwicklung von Bewertungskriterien bei Parametervariationen beobachten zu können.⁵⁸

Ebenso ist eine Bewertung auf qualitativer Basis möglich. Dies ist dann der Fall, wenn das erwartete Verhalten stark situationsabhängig und nicht abstrakt durch Formeln beschreibbar ist. In diesem Fall ist es dennoch wichtig, dass Prozesse zur Standardisierung der Bewertung genutzt werden, um wissenschaftlich verwertbare Ergebnisse zu erlangen.

2.4 Behavior-Semantic Scenery Description (BSSD)^{59,60}

Die Entwicklung automatisierter Fahrzeuge und deren Funktionen bringt neue Herausforderungen im Rahmen des Entwicklungsprozesses mit sich. Basierend auf Entwicklungsstrukturen nach Systems Engineering steht am Anfang des Entwicklungsprozesses die Definition von Anforderungen und eine Ableitung der daraus notwendigen Funktionen. Diese Funktionen werden dann auf logische und physische Systeme verteilt.⁶¹ Nach einer Ausdetaillierung der physikalischen und logischen Systeme ist es notwendig, diese Systeme auf jeder Ebene zu verifizieren und im Anschluss zu validieren.

Die Umgebung, in der sich automatisierte Fahrzeuge bewegen, wird durch die *Operational Design Domain* (ODD) beschrieben. Diese stellt die Bedingungen dar, unter denen ein Funktionieren des automatisierten Fahrzeugs erwartet wird. Die ODD repräsentiert indirekt Anforderungen, die an das Verhalten des automatisierten Fahrzeugs gestellt werden. Es ist jedoch nicht möglich, aus der ODD direkt Funktionen abzuleiten. Dafür ist es notwendig, Verhaltensanforderungen aus dem Tätigkeitsbereich des Fahrzeugs abzuleiten. Ein Überspringen dieses Prozessschritts würde in einer unzureichenden Ableitung von Anforderungen und damit auch einer unzureichenden Testfallabdeckung resultieren.

Lippert et al. haben eine semantische Beschreibung der Verhaltensanforderungen entwickelt, die aus einer Szenerie und der Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern innerhalb dieser Szenerie entstehen. Daraus resultiert die *Behavior Semantic Scenery Description* (BSSD). BSSD unterteilt die Szenerie in einzelne Streckenabschnitte in longitudinaler und lateraler Ausdehnung, die den gleichen Verhaltensanforderungen unterliegen. Diese werden als atomare Verhaltensräume bezeichnet. Atomare Verhaltensräume werden vereinfachend als Verhaltensräume (VHR) bezeichnet. Ein VHR

⁵⁷ Taguchi, G. et al.: Taguchi's Quality Engineering Handbook (2007).

⁵⁸ Schuldt, F. et al.: Systematische Auswertung von Testfällen für Fahrfunktionen im modularen virtuellen Testbaukasten (2014).

⁵⁹ Glatzki, F. et al.: Behavior-Semantic Scenery Description (BSSD) for the Development of Automated Driving Functions (2021).

⁶⁰ Lippert, M. et al.: Behavior-Semantic Scenery Description (BSSD) of Road Networks for Automated Driving (2022).

⁶¹ Kleiner, S.; Kramer, C.: Model Based Design with Systems Engineering Based on RFLP Using V6 (2013).

referenziert immer auf einen Fahrstreifen, sodass ein einzelner VHR den Teil eines Fahrstreifens repräsentiert, in dem sich Verhaltensregeln nicht verändern.

BSSD gibt nicht explizit das notwendige Verhalten vor, sondern extrahiert Verhaltensanforderungen beziehungsweise Verhaltensgrenzen innerhalb derer das Egofahrzeug sich bewegen darf, ohne dass es Verhaltensregeln verletzt. Die ODD besteht möglicherweise aus verschiedenen Räumen mit verschiedenen Verhaltensanforderungen. Daher ist es notwendig, dass BSSD neben einer Beschreibung der Verhaltensanforderungen, die möglichen Beziehungen zwischen VHR modelliert. Um den Gesamtaufbau eines Streckennetzes, das aus einzelnen VHR besteht, zu modellieren, wurde die *Road Network Representation* entwickelt. Diese ist in Abbildung 2-12 inklusive der Attribute, die VHR semantisch beschreiben, dargestellt und wird im Folgenden detaillierter beschrieben.

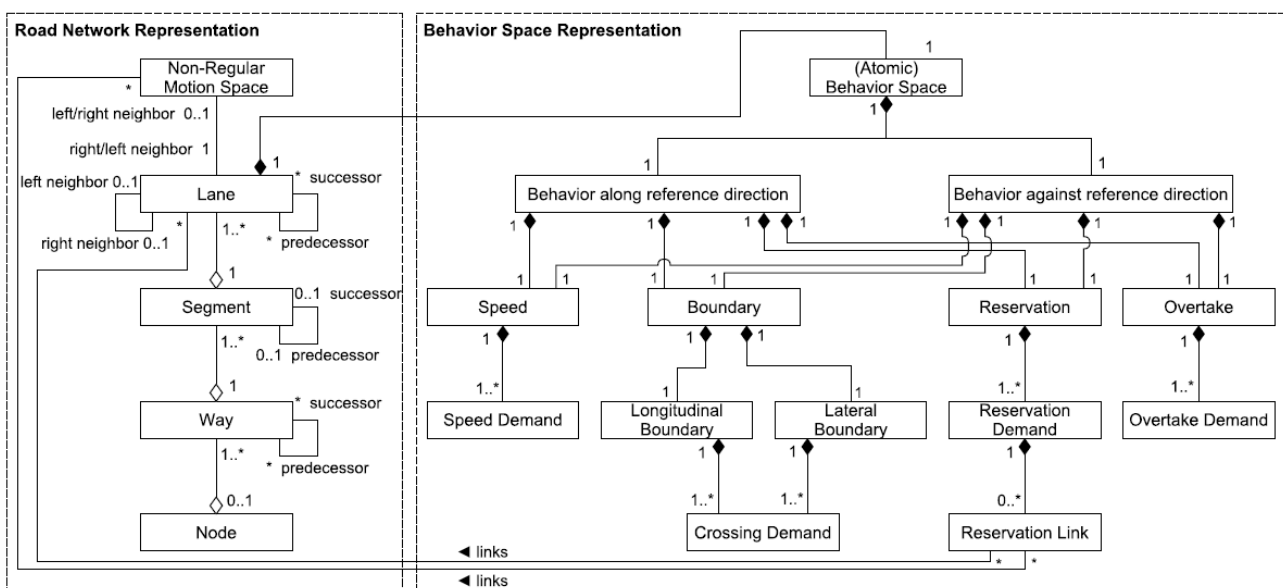


Abbildung 2-12: Hierarchischer Aufbau von BSSD⁶²

2.4.1 BSSD Road Network Representation

Es ist grundsätzlich möglich, die Szenerie in zwei Bereiche zu unterteilen. Zum einen sind dies Räume, die für das motorisierte Fahrzeuge befahrbar sind. In der Regel wird dieser Bereich im Straßenverkehr durch die Fahrbahn dargestellt. Diese Räume werden als *Regular Motion Spaces* bezeichnet. Es wird bewusst diese Beschreibung verwendet, um zu betonen, dass nicht nur Fahrstreifen, die explizit für motorisierte Fahrzeuge vorgesehen sind, *Regular Motion Spaces* darstellen. So ist es möglich, dass auch Fahrradstreifen, die sich auf der Fahrbahn befinden, Teil des regulären Bewegungsraums sind. Zum anderen existieren Räume, die ausschließlich für die Nutzung durch andere Verkehrsteilnehmer verfügbar sind. Diese Art von Raum wird als *Non-Regular Motion Space* definiert. Räume, die nicht für die Nutzung jeglicher Verkehrsteilnehmer vorgesehen sind, werden ebenfalls als *Non-Regular Motion Spaces* definiert (beispielsweise Sperrflächen).

⁶² Lippert, M. et al.: Behavior-Semantic Scenery Description (BSSD) of Road Networks for Automated Driving (2022).

Die Bewegungsräume, die für das Egofahrzeug regulär befahrbar sind, werden weiter strukturiert. Hierfür werden einige Repräsentationen des *Regular Motion Space* definiert, die Teil der hierarchischen Strukturierung des *Regular Motion Space* sind. Dabei wird auch auf deren Beziehungen zu anderen Repräsentationsformen eingegangen. Die Definitionen orientieren sich dabei an den Beschreibungen durch Lippert et al.:

Eine Lane repräsentiert den Teil eines Fahrstreifens einer Fahrbahn in dem konstante Verhaltensgrenzen vorhanden sind. Dieser kann einen Vorgänger und einen Nachfolger besitzen. Genauso ist es möglich, dass ein Fahrstreifen einen rechts oder links angrenzenden Fahrstreifen besitzt. Alternativ grenzen Non-Regular Motion Spaces an einen Fahrstreifen.

Ein Segment bezeichnet die Menge an lateral angrenzenden Lanes auf einer Höhe. Dies variiert von einer Lane bei einer Einbahnstraße zu beliebig vielen Lanes auf einer breit ausgebauten Stadtstraße. Das Segment als Repräsentationsform ist wiederum Bestandteil eines Ways.

Ein Way repräsentiert einen Streckenabschnitt und besteht aus mindestens einem Segment. Innerhalb eines Ways finden keine Zu- oder Abflüsse von motorisierten Verkehrsteilnehmern statt und die Menge an motorisierten Verkehrsteilnehmern bleibt konstant. Ein Way verbindet Knotenpunkte miteinander.

Knotenpunkte beziehungsweise *Nodes* repräsentieren eine weitere Form von Klasse des Bewegungsraums, der durch die *Road Network Representation* dargestellt wird:

Nodes stellen Abschnitte im Verkehrsnetz dar, an denen motorisierte Verkehrsteilnehmer aus unterschiedlichen Richtungen aufeinandertreffen und der Fluss an Verkehrsteilnehmern umverteilt wird.

Auf Basis dieser Definitionen ist es möglich, die Szenerie zu segmentieren und abschließend einzelne VHR abzuleiten. Dabei referenzieren diese VHR immer auf einzelne *Lanes*. Gleichzeitig ist es nicht möglich, dass ein VHR ohne Zuordnung zu einer *Lane* existiert.

2.4.2 BSSD Attribute

Um festzustellen, welche Anforderungen durch die Szenerie innerhalb eines Raums entstehen, ist es notwendig, einzelne Elemente einer Szenerie systematisch mit einhergehenden Anforderungen zu verknüpfen. Daraus resultieren Verhaltensanforderungen, die innerhalb eines Raums bestehen sowie Anforderungen, die bei einem Wechsel zu berücksichtigen sind. Diese Anforderungen werden in BSSD durch Attribute repräsentiert und semantisch beschrieben. Innerhalb eines VHR wird zwischen Anforderungen unterschieden, die sich bei einem Befahren in Referenzrichtung ergeben sowie Anforderungen, die bei einer Fahrt entgegen der Referenzrichtung bestehen. Durch die reine Darstellung von Verhaltensanforderungen ist es nicht notwendig, die Geometrie dieser VHR im Rahmen von BSSD festzulegen. Die Verhaltensanforderungen werden durch vier Attribute beschrieben: *Speed*, *Overtake*, *Reservation*, und *Boundary*. Diese werden im Folgenden näher spezifiziert.

Das *Speed* Attribut legt fest, welche Geschwindigkeit durch das Egofahrzeug in einem VHR nicht überschritten werden darf. Diese Geschwindigkeit orientiert sich an der durch die Szenerie

vorgegebenen Geschwindigkeitsbegrenzung. Es ist zudem möglich Geschwindigkeitsbegrenzungen, die von Bedingungen (beispielsweise Witterungsbedingungen) abhängig sind, zu spezifizieren.

Das Attribut *Overtake* beschreibt, ob das Überholen eines vorausfahrenden Verkehrsteilnehmers auf dem eigenen oder durch den Wechsel auf einen anderen Fahrstreifen erlaubt ist. Wie beim *Speed* Attribut ist die Spezifikation durch das Hinzufügen von bedingten Überholverboten erweiterbar.

Durch das Attribut *Reservation* wird das Vorrangsrecht innerhalb eines VHR definiert. Der Vorrang eines Verkehrsteilnehmers impliziert, dass dieser in seiner Fahr- oder Bewegungsmission nicht behindert werden darf. Dabei wird zwischen einer Eigenreservierung, einer Fremdreservierung und einer gleichberechtigten Reservierung differenziert. Diese verschiedenen Reservierungsformen werden abstrahiert als *Reservation Types* bezeichnet. Eine Eigenreservierung bedeutet, dass das Egofahrzeug selbst Vorrang besitzt und laut den Verkehrsregeln andere Verkehrsteilnehmer diesem Vorrang zu gewähren haben. Bei einer gleichberechtigten Reservierung besitzen mehrere Verkehrsteilnehmer ein Reservierungsrecht für den zu befahrenden Raum. Falls ein Typ von Verkehrsteilnehmer für einen Bewegungsraum ein Vorrangsrecht besitzt, wird dieser Raum für alle anderen Verkehrsteilnehmer als extern reserviert festgehalten. Für das Egofahrzeug ist ein dauerhafter Aufenthalt nur in einem eigenreservierten Bereich gestattet.

Um das Vorrangsrecht weiter auszudetaillieren, wird beschrieben welche Art von Verkehrsteilnehmer in einem VHR ein Reservierungsrecht besitzt. Dies können motorisierte Fahrzeuge, schienengebundenen Fahrzeuge, Fahrradfahrer oder Fußgänger sein. Diese nehmen alle regulär am Straßenverkehr teil und sind somit in der Lage, ein Reservierungsrecht zu besitzen. Neben diesen Attributen wird die semantische Beschreibung der Reservierung durch eine Berücksichtigung des Einflusses von LSA auf das Reservierungsrecht erweitert. Diese Anpassung ist notwendig, da an Kreuzungen mit LSA die Reservierungsrechte innerhalb einer Kreuzung variieren je nachdem, ob LSA ein- oder ausgeschaltet sind. Zusätzlich wird durch BSSD beschrieben, aus welcher Richtung Verkehrsteilnehmer stammen, die ein Reservierungsrecht besitzen. Dies geschieht über *Reservation Links*, die auf andere *Lanes* oder *Non-Regular Motion Spaces* verweisen.

Das vierte Attribut *Boundary* bezieht sich auf die Grenzen eines VHR. Durch die Definition dieser Grenzen wird beschrieben, welche Verhaltensregeln bei einem Verhaltensraumwechsel bestehen. Hierbei wird zwischen lateralen und longitudinalen Verhaltensraumgrenzen unterschieden, die jeweils die Anforderungen an das Egofahrzeug für laterale und longitudinale Eintritte definieren. Es sind vier verschiedene Typen von Verhaltensraumgrenzen – *Crossing Types* – vorhanden: *Allowed*, *Conditional*, *Prohibited* und *Not possible*.

Bei einer semantischen Beschreibung der Verhaltensraumgrenze durch die Instanz *Allowed* ist es für das Egofahrzeug möglich, ohne weitere Bedingungen in einen anderen VHR zu wechseln.

Die Instanz *Conditional* beschreibt, dass der Eintritt in einen VHR an eine Bedingung geknüpft ist. In longitudinaler Richtung werden an dieser Stelle vier Arten von Bedingungen vorgestellt. Diese Sammlung an Bedingungen ist jedoch frei erweiterbar. Die erste Bedingung knüpft daran an, dass ein Eintreten in einen VHR mit aktiver LSA nur erlaubt ist, wenn ein grünes Signal von der Lichtzeichenanlage ausgeht. Die zweite Bedingung berücksichtigt mögliche Stopzeichen. Dies impliziert,

dass der Eintritt in einen VHR nur dann zulässig ist, wenn das Egofahrzeug vor Eintritt zu einem vollständigen Stillstand gekommen ist. Eine weitere Bedingung beschreibt, dass ein Eintritt in einen Verhaltensraum nur dann erlaubt ist, wenn im darauffolgenden Verhaltensraum kein stagnierender Verkehrsfluss vorhanden ist. Hintergrund dieser Anforderung ist, dass das Blockieren bestimmter Bereiche vermieden werden soll, beziehungsweise nicht gestattet ist. So ist das Befahren von Fußgängerüberwegen nicht erlaubt, wenn sich direkt im Anschluss stockender Verkehr befindet⁶³. Die vierte Form von Bedingung bezieht sich darauf, dass ein Eintreten in einen Verhaltensraum nur dann gestattet ist, wenn eine interne oder externe Bedingung erfüllt ist. Interne Bedingungen bezeichnen Anforderungen, die durch das Egofahrzeug zu erfüllen sind. Dazu gehört, dass das Egofahrzeug beispielsweise einen Anlieger darstellt oder dass sich eine bestimmte Anzahl an Passagieren im Fahrzeug befindet. Externe Bedingungen kennzeichnen Anforderungen an die Umgebung beziehungsweise die Umwelt, die für einen zulässigen Eintritt notwendig sind. Dazu gehören beispielsweise Räume, die nur in eingeschränkten Zeiten betreten werden dürfen.

Eine weitere Verhaltensraumgrenze wird durch das Attribut *prohibited* definiert. Dies bedeutet, dass ein solcher Verhaltensraumübergang verboten ist, auch wenn keine geometrische Barriere vorhanden ist.

Wenn physische Barrieren vorhanden sind, werden Verhaltensraumgrenzen durch das Attribut *not possible* beschrieben. Ein Eintreten des Egofahrzeugs über diese Verhaltensraumgrenze geht mit einer möglichen Beschädigung und/oder Gefährdung von Verkehrsteilnehmern einher.

Neben diesen Verhaltensanforderungen, die aus der Extraktion von Merkmalen aus der Szenerie stammen, definiert das Konzept BSSD weitere Grundsätze, die für das Verhalten in Bezug auf die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern gelten. So wird von dem Egofahrzeug gefordert, dass Kollisionen innerhalb eines Verhaltensraums oder bei einem Verhaltensraumwechsel unabhängig vom Reservierungsrecht versucht werden zu verhindern. Des Weiteren darf das Egofahrzeug bei dem Eintritt in einen VHR Verkehrsteilnehmer mit demselben Reservierungsrecht, die sich dort bereits befinden, nicht in ihrer Fahrt behindern.

Es ist möglich, den Raum im Straßenverkehr nach BSSD zu unterteilen. Des Weiteren ist es möglich, auf Basis anderer Kartenformate BSSD zu implementieren. Notwendig für solch eine Integration in bestehende Kartenformate ist, dass Karten so aufgebaut sind, dass daraus VHR abgeleitet werden können. Dies ist dann der Fall, wenn eine genaue Unterteilung der Szenerie auf Fahrstreifenbasis innerhalb eines Kartenformats erfolgt. Solch eine Unterteilung wird im Kartenformat Lanelet2 vorgenommen, das im folgenden Kapitel näher ausgeführt wird.

2.5 Kartenformate

In diesem Kapitel wird der Aufbau verschiedener Kartenformate erläutert. Diese Kartenformate wurden aufgrund ihrer Relevanz für BSSD ausgewählt sowie auf der Basis, dass sie die Grundlage für

⁶³ Bundesministerium für Justiz: Straßenverkehrsordnung, §26

eine spätere Implementierung von Testfällen darstellen. Die hier vorgestellten Kartenformate sind Lanelet2 und Road 5.

2.5.1 Lanelet2⁶⁴

Das Format Lanelet2 von Poggenhans et al. fokussiert sich im Wesentlichen auf drei Hauptaspekte. Dies sind der Aufbau eines Straßennetzes, eine fahrstreifenbasierte Repräsentation inklusive der umliegenden Umgebung sowie eine Darstellung physischer Elemente innerhalb der betrachteten Szenerie. Diese Fokussierung entstammt aus Überlegungen, wie ein Kartenformat aufgebaut wird, um automatisierte Fahrfunktionen zu unterstützen. Drei Kernpunkte dieser Überlegungen werden im Folgenden erläutert.

So besteht eine Anforderung darin, dass auf Basis des erzeugten Netzes eine Routensuche durchführbar ist. Zudem geht es darum, dass die Karte eine Verhaltensplanung befähigt sowie einen Beitrag dazu leistet, das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer vorherzusagen. Poggenhans et al. kommen zu dem Ergebnis, dass es dafür notwendig ist, ein Kartenformat aufzubauen, das eine Repräsentation auf Fahrstreifenebene befähigt.

Die genaue geometrische Darstellung von Fahrstreifen ist für die Pfadplanung von Bedeutung. Durch das Wissen über die Grenzen eines Fahrstreifens ist eine präzise Pfadplanung besser durchführbar. Weitere Anwendungsfälle wie eine Notfallplanung von automatisierten Fahrzeugen zeigen die Notwendigkeit einer Darstellung der angrenzenden Umgebung von Fahrstreifen.

Zudem besteht der Anspruch des Projekts Lanelet2 darin, dass physische Elemente einer Szenerie innerhalb des Kartenformats abgespeichert werden. Damit ist eine präzise, hochauflösende Lokalisierung möglich. Des Weiteren ist dadurch eine Verknüpfung zwischen tatsächlichen physischen Elementen und daraus abgeleiteten Informationen durchführbar. Aufgrund der Tatsache, dass Straßenumgebungen Veränderungen ausgesetzt werden, ist diese Verknüpfung wichtig, um einer Änderung der Informationslage eine Veränderung der realen Szenerie zuzuordnen.

Aus diesen Ansprüchen ist das Kartenformat Lanelet2 entstanden, dessen Architektur aus drei Schichten besteht. Diese sind der *Physical Layer*, der *Relational Layer* und der *Topological Layer*. Physische Elemente aus der Szenerie werden innerhalb des *Physical Layers* gespeichert. Dazu gehören insbesondere die physischen Grenzen der Fahrbahn. Im *Relational Layer* werden die Fahrstreifen, Flächen und Verkehrsregeln aufgebaut. Dazu gehört auch, dass ein Bezug zwischen dem beobachtbaren *Physical Layer* und dem *Relational Layer* hergestellt wird. Der *Topological Layer* spezifiziert wiederum die Beziehungen von Instanzen im *Relational Layer*. So werden hier beispielsweise die Nachbarn eines Fahrstreifens definiert.

Im nächsten Schritt wurde von Poggenhans et al. eine entsprechende Implementierung entworfen. Diese nutzt das OpenStreetMap (OSM) Format. Allerdings wird nur die Extensible Markup Language-Struktur (XML-Struktur) des Formats genutzt. Die in OSM verwendeten Klassen werden nicht

⁶⁴ Poggenhans, F. et al.: Lanelet2: A high-definition map framework for the future of automated driving (2018).

direkt verwendet. Für Lanelet2 werden fünf grundlegende Klassen entworfen: *Points*, *Linestring*, *Lanelets*, *Areas* und *Regulatory Elements*. Dabei korrespondieren die ersten beiden Klassen zu der physischen Schicht, während die anderen drei Elemente dem *Relational Layer* angehören.

Points besitzen Koordinaten in alle drei Raumrichtungen. Diese basieren im OSM-Format auf der OSM-Klasse *Nodes*. *Nodes* werden innerhalb einer Karte durch x- und y-Koordinaten definiert (optional noch mit Elevationsangabe). *Points* repräsentieren in der Regel Teile eines *Linestrings*, welche auf der OSM-Klasse *Ways* basieren. *Ways* stellen Linienverbindungen zwischen einzelnen *Nodes* dar. *Points* werden auch zur Repräsentation vertikaler Strukturen wie LSA genutzt. *Linestrings* setzen sich aus einzelnen Punkten zusammen. Die Verläufe eines *Linestrings* werden durch lineare Interpolation zwischen den einzelnen Punkten bestimmt. Auf einer abstrakteren Ebene repräsentieren diese die Formen von physischen Elementen, die sich im Raum ausbreiten. Diese Klasse stellt dabei unter anderem Fahrbahnbegrenzungen oder Fahrstreifenbegrenzungen dar.

Lanelets stellen atomare Räume mit gerichteter Bewegung innerhalb der Szenerie dar. *Lanelets* setzen sich aus zwei *linestrings* zusammen, die atomare Räume lateral abgrenzen. Diese Räume werden von Poggenhans et al. als atomar bezeichnet, da innerhalb dieser Räume konstante Verkehrsregeln bestehen. Hierbei besteht eine Parallele zu den Konzepten von Lippert et al.. Diese gehen jedoch noch einen Schritt weiter und repräsentieren nicht Räume konstanter Verkehrsregeln, sondern Räume konstanter Verhaltensanforderungen. Durch *Lanelets* werden Fahrstreifen oder auch weitere Szenerieelemente wie Fahrradstreifen dargestellt. *Linestrings* stellen zudem die geometrischen Grenzen von *Areas* dar. *Areas* sind abgeschlossene Flächen, die keine gerichtete Bewegung innerhalb ihres Bereichs festgelegt haben. Es ist zudem möglich, dass *Areas* Flächen repräsentieren, die nicht dafür vorgesehen sind, durch motorisierte Fahrzeuge oder andere Verkehrsteilnehmer befahren zu werden. *Regulatory Elements* definieren Verkehrsregeln wie Geschwindigkeitsbegrenzungen oder das Vorhandensein einer LSA. Die *Regulatory Elements* werden zudem immer mit mindestens einem *Lanelet* verbunden, um festzulegen für welche Räume eine bestimmte Verkehrsregel vorherrscht.

Ausprägungen der beschriebenen Klassen werden über *Tags* spezifiziert. Diese Tags werden in Form von *Key-Value* Paaren repräsentiert. So wäre für eine Geschwindigkeitsbegrenzung der *Key Speed Limit* und der *Value* wäre die vorhandene Geschwindigkeitsbegrenzung innerhalb eines *Lanelets*.

Abbildung 2-13 zeigt eine beispielhafte Szenerie sowie deren Umsetzung im Lanelet2 Format. Diese Umsetzung setzt sich aus den drei Schichten des Formats sowie der Implementierung innerhalb dieser Architektur zusammen. Die Abbildung zeigt verschiedene Fahrstreifen, die in dieselbe Richtung verlaufen. Diese Fahrstreifen werden durch *Lanelets* im *Relational Layer* dargestellt. Zudem werden die vorhandenen Verkehrsregeln, wie eine Geschwindigkeitsbegrenzung von $100 \frac{km}{h}$, durch Instanzen der Klasse *Regulatory Elements* festgehalten.

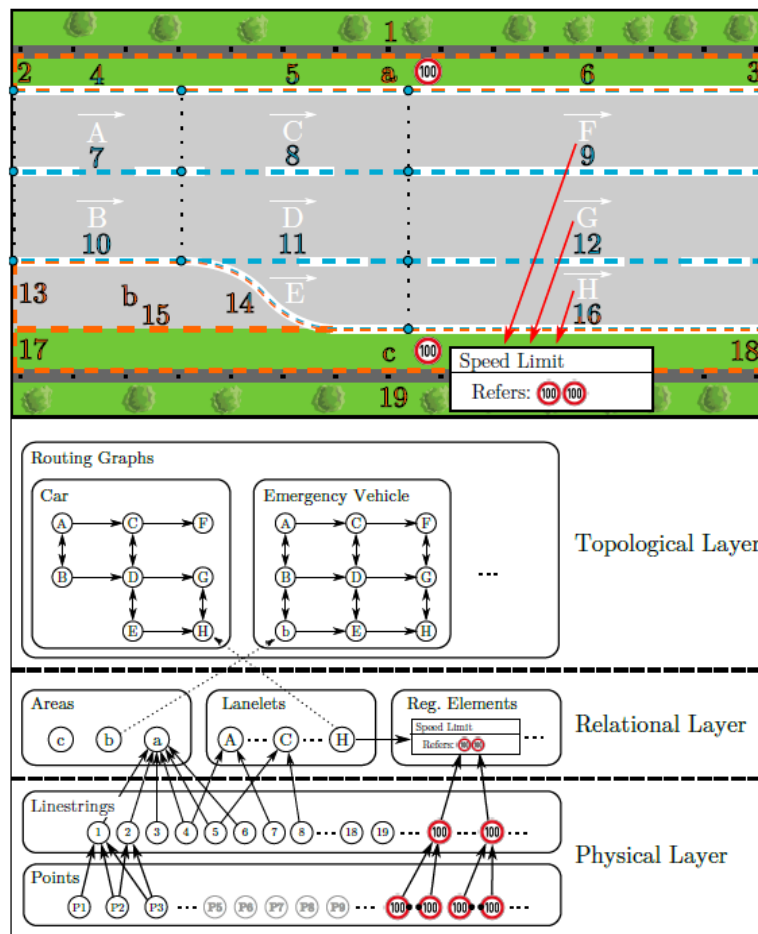


Abbildung 2-13: Übersetzung einer Szenerie in verschiedene Schichten von Lanelet2⁶⁵

Es ist des Weiteren möglich, Freiflächen durch *Areas* zu modellieren. Die Zusammensetzung von *Lanelets* aus *Linestrings* und einzelnen Punkten (*Points*) wird auf der physischen Ebene beschrieben. So besteht das *Lanelet* A aus den *Linestrings* 4 und 7. Diese setzen sich wiederum aus einzelnen Punkten zusammen. Die topologische Ebene dient dazu, die Beziehungen von *Lanelets* zueinander zu modellieren. Somit weiß das Egofahrzeug, dass es von A aus in die Räume B oder C wechseln kann. Zudem wird ein weiterer Graph aufgebaut, der speziell für Notfallfahrzeuge ausgelegt ist.

2.5.2 Road 5⁶⁶

Road 5 ist ein Kartenformat, das speziell von der Firma IPG Carmaker GmbH entwickelt wurde. Es dient dazu, Fahrzeugsimulationen durchzuführen. Innerhalb des Formats ist es möglich, Straßengeometrien zu erzeugen und Verkehrsteilnehmer in die erstellte Szenerie zu integrieren.

⁶⁵ Poggenhans, F. et al.: Lanelet2: A high-definition map framework for the future of automated driving (2018).

⁶⁶ IPG Carmaker: Road 5 (2022).

Das Format besitzt eine hierarchische Struktur, das aus Straßen (*roads*) mit beliebig vielen Fahrstreifen (*lanes*) besteht, die durch Kreuzungen (*junctions*) miteinander verbunden werden. Abbildung 2-14 stellt die Baumstruktur des Kartenformats dar.

Straßen werden dabei durch *Links* repräsentiert, deren Endpunkte durch Knotenpunkte definiert werden. Innerhalb dieser Links können Fahrstreifen erstellt werden, die in ihrer Fahrtrichtung variieren. Die Geometrie der Fahrstreifen orientiert sich an einer Referenzlinie der *links*. X- und Y-Koordinaten werden festgelegt, um den Geometrieverlauf zu definieren. Zusätzlich ist es möglich, einen Höhenverlauf für die einzelnen Fahrstreifen zu definieren. Kreuzungen sind zudem durch die Schaffung verschiedener Kreuzungskategorien individuell gestaltbar. So kann eine Kreuzung klassisch gestaltet werden sowie von einer klassischen Gestaltung durch Bypässe abgewichen werden. Zudem ist es auch möglich, Kreisverkehre zu konstruieren.

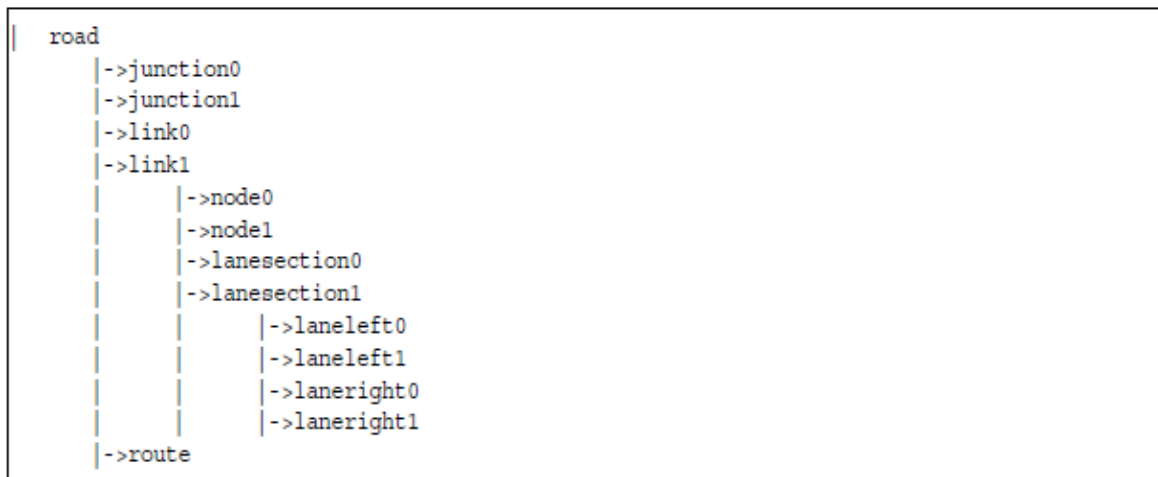


Abbildung 2-14: Baumstruktur des Road5 Kartenformats⁶⁷

Auf diesen Fahrstreifen besteht die Möglichkeit, Pfade zu erstellen. Das ist die Grundlage dafür, die Pfade von einzelnen Verkehrsteilnehmern zu definieren. Es existieren drei verschiedene Kategorien von Pfaden. Dies sind Fahrstreifenpfade, Verbindungspfade und Nutzerpfade. Fahrstreifenpfade führen entlang der Fahrstreifen während Verbindungspfade es ermöglichen, zwischen verschiedenen Fahrstreifen zu wechseln. Nutzerpfade ermöglichen es, einen individuellen Pfad durch die Setzung von Wegpunkten festzulegen. Um Fahrzeuge dann gewisse Pfade entlang fahren zu lassen, werden Routen eingeführt. Diese Routen bestehen aus miteinander verbundenen Pfaden. Verkehrsteilnehmer können dann mit diesen Routen verknüpft werden. Im Road 5 Format sind alle möglichen Formen von Verkehrsteilnehmern darstellbar.

Neben geometrischen Aspekten gehören zu der Szenerie auch noch Verkehrselemente. Diese werden auch innerhalb des Road 5 Formats gespeichert. Die Zugehörigkeit von Verkehrselementen zu gewissen *Links* wird durch die hierarchische Struktur des Formats dargestellt. Verkehrselemente werden über eine ID gespeichert. Zudem erfolgt eine Spezifikation, welches Verkehrselement an welcher

⁶⁷ IPG Carmaker: Road 5 (2022).

Stelle positioniert wird. So ist es möglich, beispielsweise LSA oder Verkehrsschilder in das Szenario zu integrieren.

Ein Vorteil des Formats besteht darin, dass es in das OpenDrive Format exportierbar ist. Dieses Format ist weiterverbreitet und ist in Kombination mit dem Format OpenScenario nutzbar, um Szenarien vollständig zu definieren. Die Begrifflichkeiten in OpenScenario orientieren sich dabei an den in Kapitel 2.1 vorgestellten Begriffen, die für eine Szenariodefinition notwendig sind.

3 Anforderungsanalyse

Das wesentliche Ziel dieser Arbeit besteht darin, eine Methodik zur Generierung von Testfällen auf Basis von BSSD zu entwickeln. Das Ziel, solch eine Methodik zu generieren, wird in diesem Kapitel näher spezifiziert. Dies geschieht, indem Anforderungen an ein gesamthafes Testkonzept sowie Anforderungen an Szenarien erarbeitet werden. Nach einer Spezifikation der Anforderungen auf einer Gesamtebene erfolgt eine Ausdetaillierung in Bezug auf die einzelnen Schritte eines Testkonzepts. Diese Anforderungen werden bei der Entscheidungsfindung im Rahmen der Methodikgenerierung berücksichtigt. Zudem dienen sie als Grundlage für eine spätere Evaluation in Kapitel 7.

3.1 Anforderungen an ein Testkonzept

Bei den Anforderungen an ein Testkonzept für das Testen automatisierter Fahrzeuge, wird sich an Winner et al. orientiert. Diese haben eine Reihe an Anforderungen an ein Testkonzept entwickelt und werden in einem ersten Schritt beleuchtet. Die Kriterien werden dabei in Effizienz- und Effektivitätskriterien unterteilt.

Als Effektivitätskriterien werden Repräsentativität, Variierbarkeit und Beobachtbarkeit genannt. Repräsentanz ist dann gegeben, wenn ein Testkonzept eine Reihe an Anforderungen an ein Modul oder ein System stellt, das mit den Anforderungen, die in der Realität existieren, übereinstimmt. Das bedeutet, dass die Anforderungen an das Testobjekt vollständig sein müssen. Konkret bedeutet dies zum Beispiel, dass ein hochautomatisiertes Fahrzeug nicht nur bei bestem Wetter geprüft werden darf, sondern es notwendig ist, auch andere Witterungsbedingungen zu berücksichtigen. Hierfür ist es wichtig, dass „Fahrzeuggrenzmuster beachtet werden“. Fahrzeuggrenzmuster bezeichnen Variationen beziehungsweise Kombinationen von Parametern, die für das Testobjekt besonders herausfordernd sind. Das bedeutet, dass es auch notwendig ist, solche Muster zu detektieren. Variierbarkeit bezeichnet die Anforderung, dass es innerhalb der Testumgebung möglich ist, alle entwickelten Testfälle durchzuführen. Daneben ist es auch wichtig, dass die durchgeführten Testfälle beobachtbar sind. Das bedeutet, dass die Ergebnisse eines Testfalls erfasst werden und damit der Verlauf eines Testfalls analysierbar ist. Diese Anforderung ist unabdinglich, um eine Evaluation einzelner Testfälle durchführen zu können.⁶⁸

Ein Testkonzept gilt nach Winner et al. als effizient, wenn es ökonomisch, reproduzierbar und sicher sowie frühzeitig in den Entwicklungsprozess integriert ist. Ein Testkonzept steht immer im Spannungsfeld zwischen ökonomischen Kriterien und dem Kriterium der Repräsentativität. Bereits früh im Entwicklungsprozess anzufangen zu testen, ist aus mehreren Gründen wichtig. So ist es möglich, durch frühes Testen frühzeitig im Entwicklungsprozess Fehler oder Mängel zu identifizieren. Grundsätzlich gilt, dass je ein Modul angepasst wird, desto teurer ist diese Anpassung und Implementierung. Gleichzeitig ist ein frühes Testen auch in Bezug auf die Systemebenen zu betrachten. So ist ein Testen auf höheren Ebenen unökonomisch, da sich eine Fehlersuche dann aufwendig gestaltet.⁶⁸

⁶⁸ Winner, H.; Wachenfeld, W.: Die Freigabe des autonomen Fahrens, S. 447–448.

Da durch das Projekt UNICARagil bereits einige Rahmenbedingungen gesetzt sind, ist es nicht möglich, das gesamte Testkonzept individuell aufzubauen. So ist vorgegeben, dass Testfälle zuerst in einer Simulationsumgebung durchgeführt werden und parallel dazu damit angefangen wird, mit einem Testfahrzeug auf einem Prüfgelände Testfälle durchzuführen. In dieser Arbeit wird jedoch nur eine simulationsbasierte Testumgebung erzeugt. Daher ist die Anforderung, eine effiziente Testfalldurchführung zu sichern nur in einem gewissen Rahmen zu bewerten. Aus diesen Gründen erfolgt eine individualisierte Anforderungsableitung für das Testkonzept für die Verhaltens- und Trajektorienplanung.

Tabelle 3-1 stellt die Anforderungen zusammen, die an das Testkonzept gestellt werden. Diese Anforderungen basieren auf denen von Winner et al., wobei diese Anforderungen in spezifischere Vorgaben umgewandelt wurden. So wird die ökonomische Effizienz durch Anforderungen wie eine minimale Anzahl an Tests und einer effizienten Auswertung dargestellt.

Tabelle 3-1: Anforderungen auf Testkonzeptebene

Anforderungen	Ebene: Testkonzept
Repräsentativität	<i>Es ist notwendig, dass das Testkonzept sämtliche Anforderungen der Verhaltens- und Trajektorienplanung validiert.</i>
Minimale Anzahl an Tests	<i>Eine vollständige Validierung der Verhaltens- und Trajektorienplanung erfolgt mit einer minimalen Anzahl an Testfällen.</i>
Effiziente Auswertung	<i>Es ist notwendig, dass das Testkonzept eine effiziente Testfallauswertung beinhaltet, um die Dauer für das Testen des Moduls zu begrenzen.</i>
Schnell und einfach	<i>Es ist notwendig, dass durch das Testkonzept eine schnelle und einfache Testdurchführung ermöglicht wird. Das bedeutet, dass sich ein Test mit vertretbarem Aufwand erzeugen und durchführen lässt.</i>
Sicher	<i>Das entwickelte Testkonzept stellt sowohl für das Testobjekt als auch für Personen, die an dem Test beteiligt sind, kein Risiko einer Beschädigung beziehungsweise Verletzung dar.</i>
Reproduzierbarkeit	<i>Das Testkonzept ermöglicht, dass Testergebnisse reproduzierbar sind.</i>
Isolation des Testobjekts	<i>Das entwickelte Testkonzept stellt sicher, dass nur die Verhaltens- und Trajektorienplanung getestet wird und keine weiteren Systeme zu Fehlern führen können.</i>
Bewertbarkeit	<i>Das entwickelte Testkonzept stellt sicher, dass die Verläufe und Ergebnisse von Testfällen bewertbar beziehungsweise analysierbar sind.</i>
Durchführbarkeit	<i>Im Rahmen des Testkonzepts ist es möglich, alle generierten Testfälle auch anschließend durchzuführen.</i>

3.2 Anforderungen an die einzelnen Testkonzeptebenen

Diese abgeleiteten Anforderungen auf makroskopischer Ebene lassen sich auf die einzelnen Schritte des Testkonzepts verteilen beziehungsweise werden weiter spezifiziert. Daher wird gesondert betrachtet, inwiefern die einzelnen Schritte zu der Gesamtanforderungserfüllung beitragen.

Der erste Schritt besteht aus der Testobjektanalyse. Dieser Schritt ist insbesondere wichtig, um die Anforderung der Repräsentativität zu erfüllen. Es ist essenziell wichtig, Anforderungen für das Testobjekt vollständig abzuleiten. Nur so ist es möglich, das Objekt ausreichend zu testen. Wie von Glatzki et al. beschrieben, hat eine mangelhafte Anforderungsableitung Konsequenzen für den gesamten Prozess durch eine Propagation dieses anfänglichen Fehlers⁶⁹. Es ist zudem möglich, dass bei der Evaluation des Testkonzepts dann falsche Rückschlüsse gezogen werden würden, nachdem alle abgeleiteten Anforderungen abgetestet wurden, diese jedoch nicht alle existierenden Anforderungen darstellen. Ein weiterer wichtiger Bestandteil der Testobjektanalyse besteht darin, die Eingangsquellen des Systems zu identifizieren. Es ist notwendig, auf Basis der Analyse einen genauen Überblick über den Funktionsbereich der Verhaltens- und Trajektorienplanung zu erlangen, was die Grundanforderung der Isolation des Testobjekts betrifft. Tabelle 3-2 stellt die eigens erstellten Anforderungen dar, die bei der Objektanalyse berücksichtigt werden. Diese Anforderungen werden unter Berücksichtigung der Ziele auf makroskopischer Ebene erstellt.

Tabelle 3-2: Anforderungen an die Testobjektanalyse

Anforderung	Ebene: Testobjektanalyse
Vollständige Anforderungsableitung	<i>Es ist notwendig, dass auf Basis der Testobjektanalyse eine vollständige Anforderungsableitung durchgeführt wird.</i>
Definierung des Aufgabenbereichs	<i>Durch die Testobjektanalyse ist eindeutig geklärt, welche Aufgaben im Bereich der Verhaltens- und Trajektorienplanung liegen.</i>
Identifikation der Systemeingänge und deren Herkunft	<i>Durch die Testobjektanalyse sind Systemeingänge sowie die Form und Herkunft der Systemeingänge identifiziert.</i>

Nach der Testobjektanalyse findet die Testfallgenerierung statt. Am Anfang ist es notwendig, herauszufinden wie die Anforderungen an dem Testobjekt abgetestet werden. Eine wichtige Aufgabe dieses Prozessschritts ist es, alle Faktoren zu bestimmen, die den Erfüllungsgrad von Anforderungen an das Testobjekt beeinflussen. Anschließend erfolgt auf Basis einer Kombination dieser Einflussfaktoren die Generierung von Testfällen. Dafür ist es zudem notwendig, Parameterbereiche für einzelne Faktoren zu identifizieren. Zudem ist die Gestaltung der Testfallgenerierung wesentlich dafür verantwortlich, dass möglichst wenig Testfälle benötigt werden, um abschließende Aussagen über den Funktionsgrad des zu testen Moduls treffen zu können. Dazu gehört, dass nur Testfälle generiert werden, die eine Relevanz besitzen im Hinblick auf die Funktionsfähigkeit der Verhaltens- und

⁶⁹ Glatzki, F. et al.: Behavior-Semantic Scenery Description (BSSD) for the Development of Automated Driving Functions (2021).

Trajektorienplanung. Des Weiteren besteht ein Ziel darin, Testfälle mit wenigen inhaltlichen Schnittmengen zu generieren. Eine effiziente Testfallgenerierung impliziert zudem, dass nach dem Abschluss einzelner Testfälle möglichst universell geltende Aussagen zu dem Erfüllungsgrad überprüfter Anforderungen getroffen werden können. Des Weiteren ist wichtig, dass Grenzfälle durch die Methodik identifiziert werden, sodass diese auch getestet werden.

Dementsprechend ist es notwendig, eine Methodik zu entwickeln, die solch eine Effizienz bei vollständiger Validierung des Systems gewährleistet. Die Generierung von Testfällen ist zugleich die Hauptaufgabe dieser Arbeit. Tabelle 3-3 fasst die Anforderungen, die an die Testfallgenerierung gestellt werden, zusammen.

Tabelle 3-3: Anforderungen an die Testfallgenerierung

Anforderung	Ebene: Testfallgenerierung
Aufbau einer Testumgebung	<i>Es ist notwendig, eine Umgebung zu schaffen, in der die Einhaltung von Anforderungen an die Verhaltens- und Trajektorienplanung grundsätzlich überprüft werden kann.</i>
Identifikation von Einflussfaktoren	<i>Es ist innerhalb des Schritts der Testfallgenerierung notwendig, alle Einflussfaktoren für die Erfüllung von Anforderungen an die Verhaltens- und Trajektorienplanung zu identifizieren und zu repräsentieren.</i>
Bestimmung der Parameterbereiche von Einflussfaktoren	<i>Für einzelne Eingänge in die Verhaltens- und Trajektorienplanung sind Parameterbereiche und Diskretisierungsstufen definiert.</i>
Entwicklung einer Kombinatorik zur Effizienzsicherung	<i>Eine Kombinatorik zur Variation der Parameter wurde entwickelt und stellt eine effiziente Testfallgenerierung sicher.</i>

Nachdem Testfälle generiert wurden, erfolgt im nächsten Schritt die Testfalldurchführung. Die Gestaltung der Durchführung ist wie erwähnt begrenzt beeinflussbar, da bereits bestimmt wurde, in welcher Simulationsumgebung die Testfälle durchgeführt werden. Die Testfälle werden im Rahmen dieser Arbeit in einer Simulationsumgebung durchgeführt. Während dieses Schritts ist es wichtig, dass nur der Aufgabenbereich der Verhaltens- und Trajektorienplanung abgeprüft wird. Ein Ziel besteht darin, dass die Eingänge in der Simulationsumgebung erfolgreich an das Testobjekt weitergeleitet werden. Zudem ist es notwendig, dass eine Variierbarkeit des Testsystems besteht, um alle Testfälle durchführen zu können. Ein weiterer wichtiger Faktor für das erfolgreiche Testen der Verhaltens- und Trajektorienplanung besteht darin, dass die Stabilität beziehungsweise Robustheit des Systems gewährleistet wird. Das bedeutet, dass die Testumgebung zuverlässig funktioniert. Außerdem wird durch diesen Schritt die Reproduzierbarkeit von Testfällen bestimmt. Es ist notwendig, eine Simulationsumgebung zu schaffen, in der bei gleichen Situationen identische Testergebnisse entstehen.

Tabelle 3-4 stellt die gesammelten Anforderungen an diese Phase des Testkonzepts dar.

Tabelle 3-4: Anforderungen an die Testfalldurchführung

Anforderung	Ebene: Testfalldurchführung
Isoliertes Testen des Testobjekts	<i>Der Simulationsaufbau beinhaltet nur Aufgaben, für die die Verhaltens- und Trajektorienplanung verantwortlich ist.</i>
Anschließen des Testobjekts an das Gesamtsystem	<i>Die Systemeingänge sind mit dem Testobjekt verbunden und die Ausgänge des Testobjekts sind mit darauffolgenden Modulen verbunden.</i>
Variierbarkeit der Testumgebung	<i>Es ist möglich, erzeugte Szenariovariationen in der Simulationsumgebung umzusetzen.</i>
Stabilität und Robustheit des Systems	<i>Die Simulationsumgebung funktioniert stabil und zuverlässig, sodass der Zeitaufwand für die Testfalldurchführung minimiert wird.</i>
Reproduzierbarkeit des Systems	<i>Gleiche Eingänge des Systems führen zu gleichen Ergebnissen. Die Durchführung der Simulationen funktioniert deterministisch.</i>

Der letzte Schritt innerhalb des Testkonzepts beinhaltet die Auswertung der Testfälle. Diese Auswertung sollte anhand objektiver Kriterien geschehen damit daraus folgend eindeutige Aussagen über die Funktionsfähigkeit der Verhaltens- und Trajektorienplanung getroffen werden können. Um eine Auswertung durchzuführen, ist die Festlegung eines Formats zur Speicherung von Informationen essenziell. Zudem ist für ein effizientes Testkonzept eine schnelle und einfache Auswertung notwendig. Diese Anforderung impliziert, dass eine weitestgehende Automatisierung der Testfallauswertung erforderlich ist. Es ist zudem notwendig, dass der Fehler innerhalb eines Testfalls identifizierbar ist, da sonst keine hilfreichen Aussagen für die Funktionsentwickler getroffen werden können. Die Ergebnisse der Testfallauswertung sind nachvollziehbar festzuhalten, sodass es für Funktionsentwickler möglich ist, möglichst schnell Lösungen für etwaige Unzulänglichkeiten zu finden. Besonders hilfreich hierfür sind nachvollziehbare Fehlermeldungen und Systemzustände⁷⁰. Neben dieser semantischen Ausgabe ist es erforderlich, dass das Verhalten des Fahrzeugs visuell dargestellt wird, um die Ergebniszusammenfassung zu ergänzen.

⁷⁰ Jungmayr, S.: Testbarkeitsanforderungen an die Software (2008).

Tabelle 3-5: Anforderungen an die Testfallauswertung

Anforderung	Ebene: Testfallauswertung
Entwicklung von objektiven Testkriterien	<i>Die Testkriterien zur Bewertung von Testfällen lassen einen eindeutigen Rückschluss auf die Funktionsfähigkeit der Verhaltens- und Trajektorienplanung zu.</i>
Bestimmung eines Formats zur Informationsspeicherung	<i>Die aus der Simulation stammenden Ergebnisse werden in geeigneten Formaten gespeichert, um darauf basierend eine Auswertung vornehmen zu können.</i>
Schnelle und einfache Auswertung der Ergebnisse	<i>Die Auswertung erfolgt schnell und einfach. Dazu ist eine Automatisierung des Auswertungsprozesses erforderlich.</i>
Nachvollziehbarkeit der Ergebnisauswertung	<i>Die aus der Auswertung generierten Ergebnisse sind verständlich und hilfreich für Entwickler, um Funktionsprobleme lösen zu können.</i>

4 Methodik zur Generierung funktionaler Szenarien

Funktionale Szenarien sind eine Kategorie von Szenarien, die einen hohen Abstraktionsgrad besitzen. Bevor eine Konkretisierung von Szenarien durchgeführt wird, ist es vorteilhaft auf dieser abstrakten Ebene zu verbleiben, um eine frühzeitige Parameterexplosion zu vermeiden. Des Weiteren ist es so möglich, gewisse Kombinationen auf einer abstrakten Ebene auszuschließen und den Parameterraum weiter einzugrenzen. Um funktionale Szenarien zielgerichtet zu generieren, ist es notwendig, in einem ersten Schritt die Verhaltens- und Trajektorienplanung genauer zu betrachten. Daher wird der Aufgabenrahmen des Moduls geklärt. Dazu gehört auch, dass die möglichen Systemeingänge und -ausgänge festgelegt werden. Neben den geforderten Fähigkeiten, die durch das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) im Rahmen des Projekts UNICARagil entwickelt wurden, ist es möglich, auf Basis von BSSD Anforderungen zu bestimmen.

Auf der Grundlage des von Glatzki und Lippert entwickelten BSSD Konzepts werden anschließend Szenarien aufgebaut. Um zu bewerten, ob das Konzept für die Generierung funktionaler Szenarien zur Überprüfung der Verhaltens- und Trajektorienplanung geeignet ist, werden verschiedene Arbeitshypothesen aufgestellt und verifiziert. Nach der Überprüfung dieser Hypothesen wird ein Prozess zur Szenarioerzeugung beschrieben, der aus drei Schritten besteht: der Szenerieerzeugung, der Szenenerzeugung und anschließend der Szenarioerzeugung.

4.1 Analyse der Verhaltens- und Trajektorienplanung

Die Analyse der Verhaltens- und Trajektorienplanung hilft, ein näheres Verständnis über das Aufgabengebiet des Testobjekts zu erlangen. Dies ist wichtig, um Szenarien zielgerichtet aufzustellen, was beispielsweise durch ein Verständnis über relevante Rahmenbedingungen und Limitierungen des Moduls ermöglicht wird. Es ist ebenfalls hilfreich, um mögliche Fehlerquellen während der Implementierungsphase schneller zu identifizieren.

Abbildung 4-1 stellt den modularen Aufbau des Projekts UNICARagil dar. Ausgehend von der Sensorik wird ein Modell der Umgebung aufgebaut. Dieses Umgebungsmodell versucht, die Zustände von Verkehrsteilnehmern zum jetzigen Zeitpunkt abzuschätzen. Gleichzeitig wird durch das Modell der Zustand der Verkehrsteilnehmer in kommenden Zeitschritten prädiziert. Das Umgebungsmodell beinhaltet auch eine Wahrnehmung der Szenerie. Auf Basis dieses Modells findet eine Lokalisierung des Fahrzeugs statt. Das bedeutet, dass die Position des Fahrzeugs innerhalb der Karte bestimmt wird. Dies ist notwendig, um anschließend die Trajektorie planen zu können.

Im Anschluss an das Modul zur Vorhersage der Bewegungen einzelner Verkehrsteilnehmer folgt in einem nächsten Schritt die Verhaltens- und Trajektorienplanung. Die Ergebnisse dieser Planung werden dann an Module zur Fahrdynamik – *Coordination Modules* – weitergeleitet, welche die Aufgabe besitzen, das Ergebnis der Trajektorie fahrdynamisch umzusetzen.

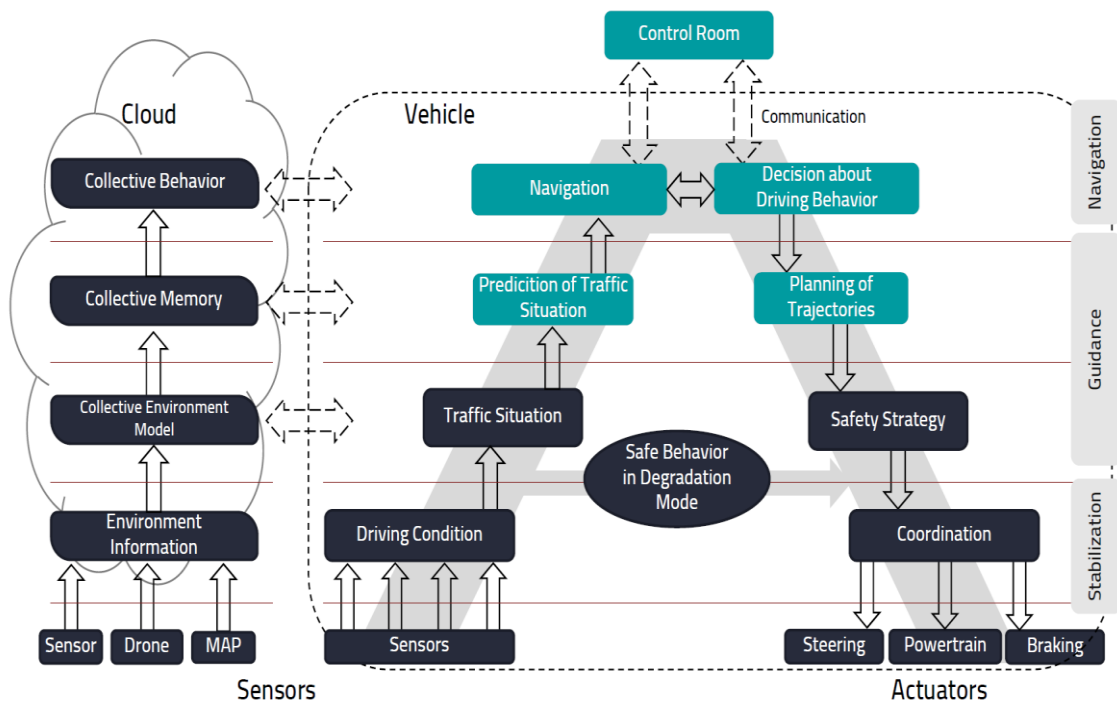


Abbildung 4-1: Aufbau der verschiedenen Module im Projekt UNICARagil⁷¹

Die Verhaltens- und Trajektorienplanung fängt mit der Planung auf einer abstrakten Ebene an. Dies wird durch die Generierung eines Verhaltens dargestellt. Nachdem das anzustrebende Verhalten determiniert wurde, besteht die Aufgabe der Trajektorienplanung darin, dieses Verhalten konkret umzusetzen. Das bedeutet, dass „die Trajektorienplanung eine Weg-Zeit-Linie berechnet, entlang derer sich das Fahrzeug bewegen soll“⁷².

Das Modul der Verhaltensgenerierung erhält ein Modell der wahrgenommenen Umgebung, Ein genauerer Aufbau des Moduls ist in Abbildung 4-2 zu sehen. In dieser Umgebung befinden sich das Egofahrzeug selbst, andere Verkehrsteilnehmer sowie unterschiedliche Reservierungsbedingungen, die beispielsweise durch Fußgängerüberwege gekennzeichnet werden. Die Verhaltensgenerierung ist dann wiederum dafür zuständig, das passende Verhalten zu einer gegebenen Situation auszuwählen. Dieses Abwägen wird durch einen *Policy Arbitrator* durchgeführt. Dieser *Policy Arbitrator* besitzt verschiedene Regeln, die bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden. In Abbildung 4-2 sind drei dieser Regeln dargestellt. Dies sind eine Regel zum Verhalten an LSA, eine Regel zum Verhalten in Bereichen mit Fußgängerreservierung und Regeln zum Verhalten an Kreuzungen ohne LSA.⁷³

Für die Generierung eines Verhaltens an Fußgängerüberwegen wird die Position und der prädierte Pfad der Fußgänger als Eingang benötigt. Falls detektiert wird, dass der Pfad des Fußgängers auf den Überweg führt, wird ein Haltebefehl an die Trajektorienplanung weitergeleitet. Um das notwendige Verhalten an Kreuzungen zu bestimmen, werden die Distanzen zum Eintreffen anderer

⁷¹ Buchholz, M.: Modulares Fahrzeugkonzept im Projekt UNICARagil (2020), S. 10.

⁷² UNICARagil: Disruptive modulare Architektur für agile automatisierte Fahrzeugkonzepte (2020).

⁷³ Buchholz, M. et al.: Automation of the UNICARagil vehicles (2020), S. 16.

Verkehrsteilnehmer in der Kreuzung benötigt sowie die Geschwindigkeit, mit der sie sich auf die Kreuzung hinbewegen. Ein weiterer wichtiger Faktor für die Verhaltensgenerierung an Kreuzungen ist die Kenntnis über den einsehbaren Bereich. So ist es möglich, dass beispielsweise durch Hauswände gewisse Bereiche einer Kreuzung nicht einsehbar sind. Dadurch kann das Verhalten beim Einfahren in eine Kreuzung weiter beeinflusst werden, und eine Art „Kriechen“ in die Kreuzung als Ausgang festgelegt werden. Neben diesen Regeln zur Generierung des Verhaltens ist es auch möglich, dass ein einfaches Weiterfahren als entsprechende Aktion gefordert wird.

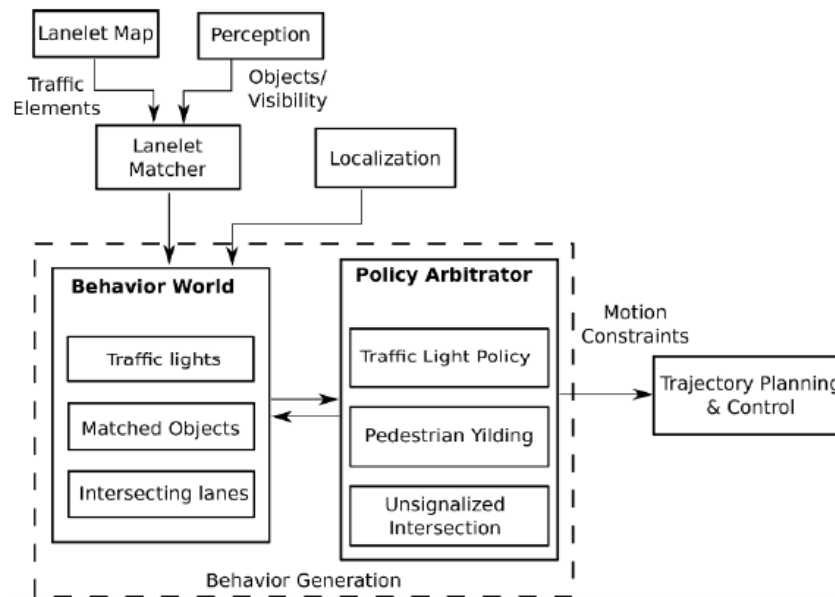


Abbildung 4-2: Struktur des Moduls zur Verhaltensplanung⁷⁴

Im Anschluss an die Verhaltensplanung folgt die Trajektorienplanung. Diese Planung wird als Optimierungsproblem ausgelegt. Dies impliziert, dass die Trajektorienplanung nicht konkret das Erreichen eines Ziels plant, sondern aufgrund von Randbedingungen für jeden Zeitschritt einen Wegpunkt plant. Bevor die Trajektorie geplant wird, wird erst ein globaler Pfad erstellt an dem sich die Trajektorienplanung orientiert. Dieser globale Pfad basiert auf dem Wissen aus der hinterlegten Lanelet2-Karte, da dort alle Fahrstreifen abgebildet sind und es so möglich ist, von einem Startpunkt aus bereits eine genaue Plantrajektorie zu erstellen. Nach diesem Schritt erfolgt die sogenannte Korridorextraktion. Hierbei wird aus dem Umgebungsmodell die befahrbare Umgebung für die nächsten Zeitschritte extrahiert. Diese Korridorextraktion differenziert nach Buchholz et al. im Projekt UNICARagil zwischen drei unterschiedlichen Fällen. Falls sich kein Verkehrsteilnehmer oder Hindernis vor dem Egofahrzeug befindet, umfasst der befahrbare Korridor die globale Trajektorie. Für den Fall, dass sich ein Hindernis oder Verkehrsteilnehmer innerhalb der globalen Trajektorie befindet, es aber für das Egofahrzeug möglich ist, auf der globalen Trajektorie zu verbleiben, findet eine Verengung des befahrbaren Korridors statt. Der dritte Fall deckt die Möglichkeit ab, dass ein Verkehrsteilnehmer sich innerhalb der globalen Trajektorie befindet, es aber nicht möglich ist, diesem auszuweichen. Als

⁷⁴ Buchholz, M. et al.: Automation of the UNICARagil vehicles (2020), S. 16.

Konsequenz daraus wird der Korridor an dieser Stelle abgeschnitten, bevor es zu einer Kollision kommt.

Wenn der Prozess der Korridorextraktion abgeschlossen ist, folgt das Lösen des Optimierungsproblems. In diese Gleichung fließen neben dem befahrbaren Korridor und dem vorgegebenen Verhalten weitere Faktoren ein. Darunter fallen Vorgaben zur Minimierung der Längsbeschleunigung sowie eine Minimierung von Drehbeschleunigungen. Zusätzlich wird sich an der Referenzlinie sowie der Referenzgeschwindigkeit orientiert. Es ist insbesondere notwendig, dass die Trajektorienplanung die fahrdynamischen Grenzen mitberücksichtigt. Daher fließen diese auch als Randbedingungen ein.

Als Ausgang aus der Verhaltens- und Trajektorienplanung folgt eine Vorgabe von Punkten in x- und y-Richtung mit dem verbundenen Zeitschritt, in dem diese Ziele planmäßig zu erreichen sind. Gleichzeitig ist eine Abgrenzung des Moduls wichtig. So gehört weder die Verarbeitung von Sensorsignalen und die anschließende Detektion von Verkehrsteilnehmern noch die Vorhersage des Verhaltens von Verkehrsteilnehmern zu den Aufgaben des Moduls.

4.2 Ableitung von Anforderungen an die Verhaltens- und Trajektorienplanung

Aus diesen Ergebnissen ist es möglich, nun Anforderungen abzuleiten. Dazu werden verschiedene mögliche Verhalten des Egofahrzeugs aufgestellt. Die angestrebten Verhaltensweisen des Egofahrzeugs stammen aus Rücksprachen mit Funktionsentwicklern des KIT. Im Anschluss daran werden die Anforderungen an die Verhaltensweisen aus BSSD Sicht aufgestellt, die durch die Szenariogenerierung zu validieren sind. Des Weiteren werden diese Anforderungen ergänzt, um das Verhalten nicht nur auf einer abstrakten Ebene zu überprüfen, sondern um auch konkret die Trajektorienplanung zu testen. Dafür werden weitere Anforderungen benötigt, die sich insbesondere an den fahrdynamischen Ausprägungen der Trajektorienplanung orientieren. Die Anforderungen werden auch genutzt, um Testfallkriterien abzuleiten. Eine Sammlung der in diesem Kapitel erstellten Anforderungen und entsprechenden Testfallkriterien ist in Anhang D dargestellt. Daneben entsteht zusätzlich die Möglichkeit, die erstellte Methodik darauf zu überprüfen, ob sie die in diesem Teilkapitel entwickelten Anforderungen im Rahmen der Szenarioerstellung überprüft.

Im Fahrstreifen verbleiben

Das Verbleiben innerhalb eines Fahrstreifens stellt das grundlegendste Verhalten dar, das für die Funktionalität der Verhaltens- und Trajektorienplanung notwendig ist. Aus Sicht von BSSD besteht hier die Anforderung darin, innerhalb der lateralen Grenzen eines Verhaltensraum zu verbleiben. Gleichzeitig ist aus fahrdynamischer Sicht ein konstanter lateraler Versatz zu beiden Seiten innerhalb des Verhaltensraums erforderlich. Dies ist besonders aus komforttechnischen Gesichtspunkten für Passagiere des Fahrzeugs relevant.

Diese Anforderungen werden in Abbildung 4-3 visualisiert. Dabei wird am ersten Wegpunkt des Egofahrzeugs kein lateraler Versatz festgestellt. Am zweiten Wegpunkt befindet sich das Egofahrzeug leicht nach oben versetzt in Relation zur Referenzlinie. Die Buchstaben V und T stehen für die spezifischen Anforderungen, die jeweils an die Verhaltensplanung und an die Trajektorienplanung gestellt werden.

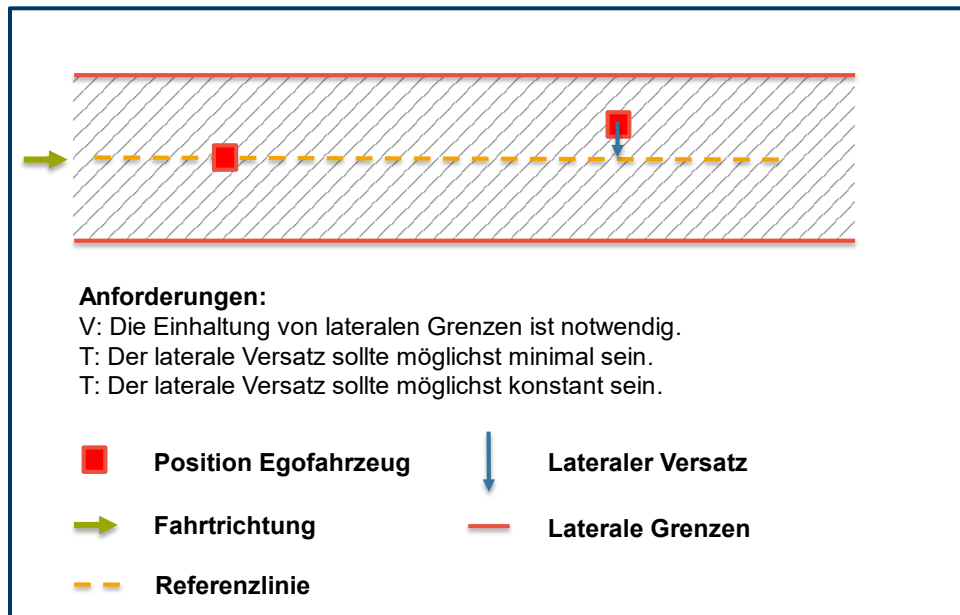


Abbildung 4-3: Visualisierung der Anforderungen zum Verhalten „Fahrstreifen halten“

Fahrstreifen wechseln

Um einen Fahrstreifen wechseln zu dürfen, ist die Erfüllung mehrerer Bedingungen notwendig. Eine Bedingung besteht darin, dass der Wechsel des Fahrstreifens zulässig ist. So definiert BSSD verschiedene Attribute für laterale Grenzen wie *Allowed* oder *Conditional*. Bei dem Attribut *Allowed* ist ein Fahrstreifenwechsel beispielsweise ohne weitere Bedingungen, die aus der Szenerie entstehen, zulässig. Es besteht somit eine Anforderung an die Verhaltensplanung, dass ein Wechsel nur dann geplant werden darf, wenn die notwendigen Bedingungen, die durch die Szenerie vorgeschrieben werden, erfüllt werden. Aus BSSD Sicht stellt ein Fahrstreifenwechsel einen Verhaltensraumübergang in lateraler Richtung dar. Für diesen Fall besteht eine weitere Anforderung an die Verhaltensplanung darin, dass bei einem Fahrstreifenwechsel keine Verkehrsteilnehmer in ihrer Fahrt behindert werden dürfen, falls diese dort das gleiche Reservierungsrecht wie das Egofahrzeug besitzen. Auch unabhängig vom Reservierungsrecht besteht die Anforderung, dass eine vermeidbare Kollision durch ein angepasstes Verhalten des Egofahrzeugs zu verhindern ist.

Im nächsten Schritt werden die Anforderungen an die Trajektorienplanung definiert. Dabei geht es bei der Trajektorienplanung darum, dass der Wechsel des Fahrstreifens ruhig verläuft. Das bedeutet, dass die äußere Grenze des Zielverhaltensraums nicht überschritten wird und somit ein Überschwingen vermieden wird. Des Weiteren besteht eine Anforderung darin, dass ein Zurückschwingen – ein Überqueren der geteilten Grenze zwischen den beiden Verhaltensräumen nach dem vollständigen Wechsel – nicht nochmal erfolgen darf. Das Gesamtziel dieser Anforderungen besteht in der Erzeugung einer harmonischen Trajektorie durch die Trajektorienplanung. Abbildung 4-4 visualisiert die Anforderungen an die Verhaltens- und Trajektorienplanung bei einem Fahrstreifenwechsel. Dabei werden beide Anforderungen an die Verhaltensplanung dargestellt. So stellt die blaue gestrichelte Linie eine laterale Verhaltensraumgrenze mit unterschiedlichen möglichen Attributen. Zudem wird durch das orange Rechteck ein potenzieller anderer Verkehrsteilnehmer im seitlich angrenzenden Verhaltensraum dargestellt, der beachtet werden muss.

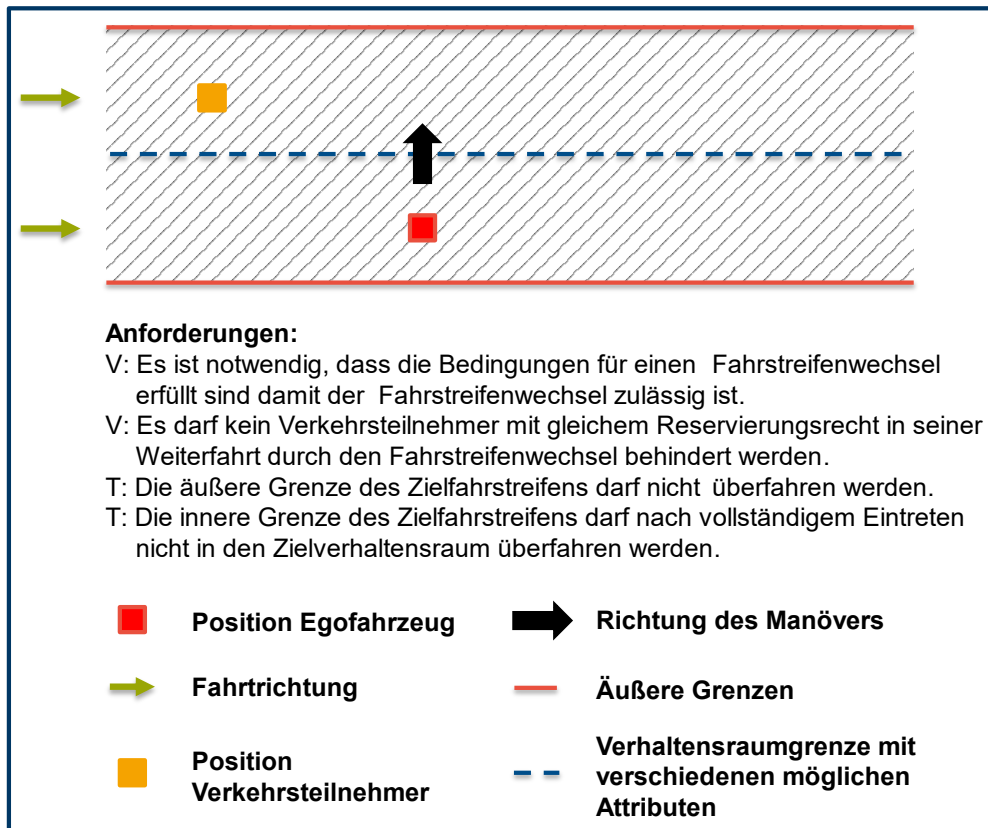


Abbildung 4-4: Visualisierung der Anforderungen zum Verhalten „Fahrstreifen wechseln“

Annähern an Verkehrsteilnehmer oder Hindernisse

Das Verhalten des Annäherns an Verkehrsteilnehmer beschreibt das notwendige Abbremsen des Egofahrzeugs bei gleichzeitiger Verringerung des Abstands in longitudinaler Richtung gegenüber einem Verkehrsteilnehmer, der sich auf demselben Fahrstreifen befindet. Dabei folgt aus der grundsätzlichen BSSD Regel, dass Kollisionen unabhängig vom Reservierungsrecht zu vermeiden sind. Daher wird die Anforderung formuliert, dass das Egofahrzeug bei einem Verkehrsteilnehmer oder Hindernis vor sich auf dem gleichen Fahrstreifen seine Geschwindigkeit entsprechend der Relativgeschwindigkeit und dem notwendigen Abstand in longitudinaler Richtung anpassen soll.

Aus Sicht der Trajektorienplanung ist es notwendig, dass das Egofahrzeug bereits frühzeitig abbremst und einen ausreichenden Abstand zu dem vorderen Verkehrsteilnehmer oder Hindernis einhält. Das bedeutet, dass die Längsbeschleunigung sowie der longitudinale Abstand als Bewertungskriterien herangezogen werden, um die Funktionsfähigkeit der Trajektorienplanung in Bezug auf diese Anforderung bewerten zu können.

Abbildung 4-5 stellt die Anforderungen dar, die bei einem Annähern an andere Verkehrsteilnehmer oder Hindernisse bestehen. Dabei gibt die Länge des Geschwindigkeitsvektors die Geschwindigkeit an. Das bedeutet, dass ein größerer Geschwindigkeitsvektor eine höhere Geschwindigkeit illustriert. Die Situation in der Abbildung stellt die Ausgangssituation dar, bevor es zu einem Annäherungsmanöver kommt.

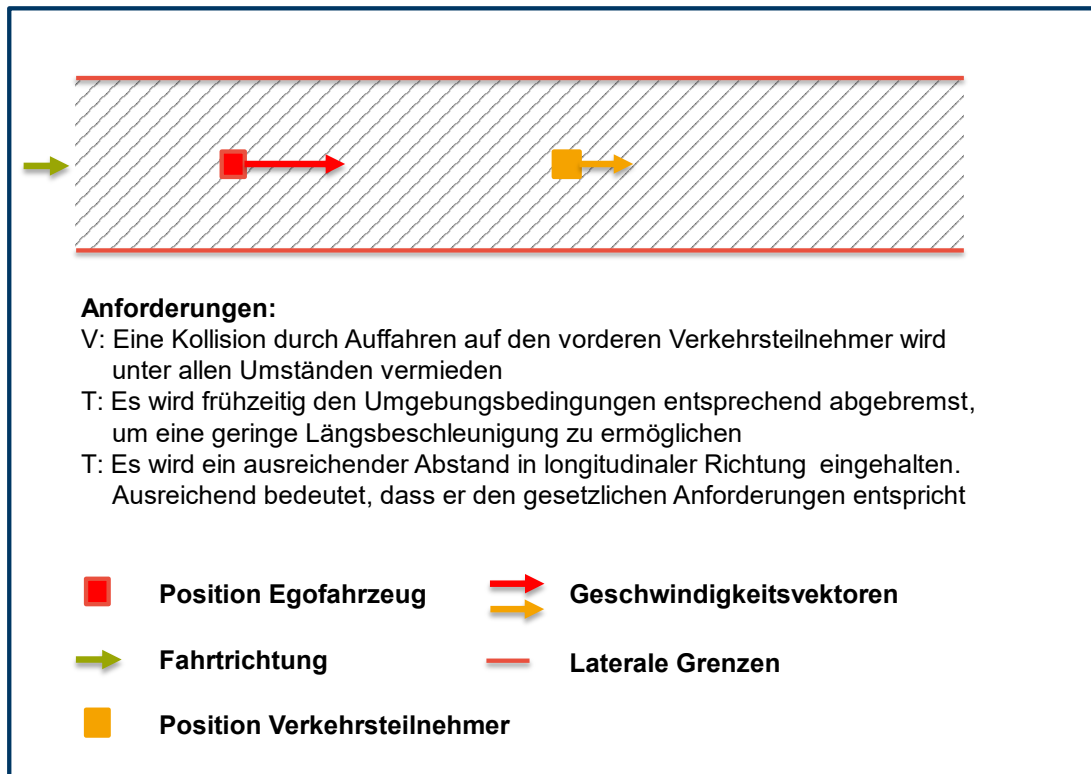


Abbildung 4-5: Anforderungen zum Verhalten „Annähern an Verkehrsteilnehmer“

Auf LSA reagieren

Die Notwendigkeit, auf LSA (LSA) zu reagieren ergibt sich aus der Straßenverkehrsordnung (StVO)⁷⁵. In BSSD ist diese aus der Szenerie stammende Verhaltensregel durch eine longitudinale Verhaltensgrenze mit dem Attribut *conditional* verbunden und der Spezifizierung, dass eine LSA vorhanden ist, die, falls sie aktiv ist, nur bei einem grünen Signal überfahren werden darf. Dementsprechend ergibt sich die Anforderung an die Verhaltensplanung, dass die Verhaltensraumgrenze in longitudinaler Richtung nur überfahren werden darf, wenn der Zustand der LSA es zulässt. Zu der Verhaltensplanung gehört auch, dass eine vertretbare Entscheidung getroffen wird, ab welcher Distanz es notwendig ist, an einer LSA zu halten.

Aus der Trajektorienplanung folgt, dass ein Abbremsen an einer LSA mit einer Längsverzögerung geplant werden sollte, die im Rahmen der fahrdynamischen Grenzen liegt. Des Weiteren ist eine Bremsung optimalerweise an einer Ampel so durchzuführen, dass die Längsbeschleunigung nicht übermäßig hoch ist, um einen Auffahrunfall durch andere Verkehrsteilnehmer zu vermeiden. Diese Anforderung ist allerdings stark vernetzt mit der Entscheidung der Verhaltensplanung, ab wann ein Halten an einer LSA erforderlich ist. Daher ist das Resultat der Trajektorienplanung viel mehr ein Ausdruck, ob die Verhaltensplanung als Modul korrekte Verhaltensentscheidungen trifft.

Abbildung 4-6 stellt die Anforderungen bei der Überfahrt an einer LSA dar. Die hier entwickelten Anforderungen stellen nur die Anforderungen dar, die streng mit der Reaktion an solch einer Anlage

⁷⁵ Bundesministerium für Justiz: Straßenverkehrsordnung, §37

zusammenhängen. Das bedeutet, dass etwaige Implikationen für die weitere Szenerie, die von einer LSA ausgehen, in diesem Schritt noch nicht berücksichtigt werden.

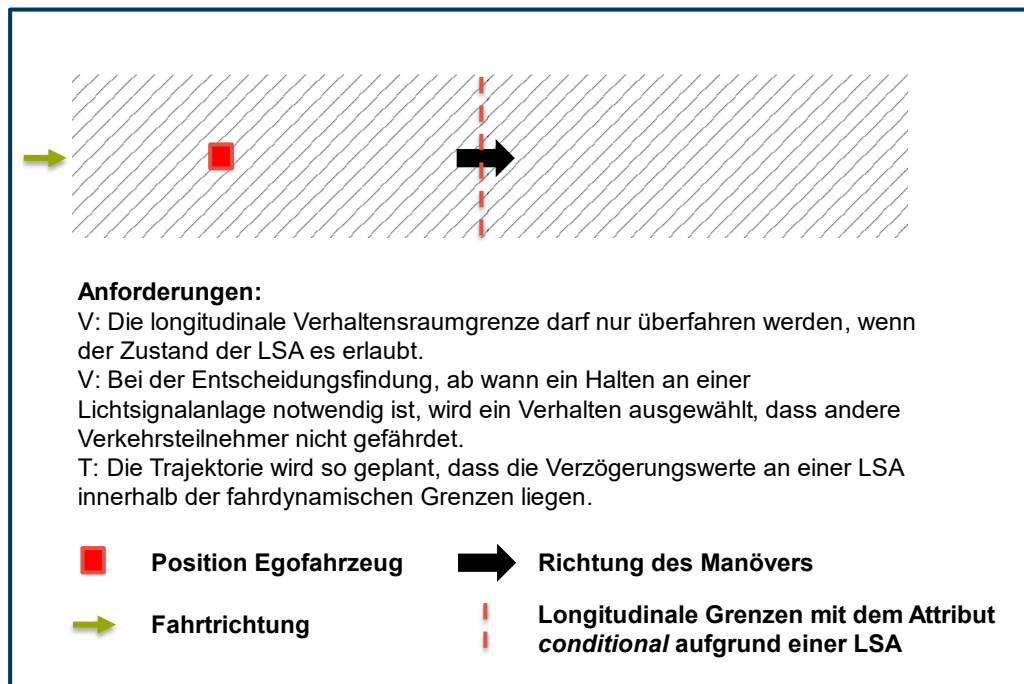


Abbildung 4-6: Anforderungen zum Verhalten „Auf LSA reagieren“

Überholen verbunden mit einem Fahrstreifenwechsel

Das Überholen verbunden mit einem Fahrstreifenwechsel kann unterschiedliche Ausprägungen besitzen. So besteht das Manöver aus einem Fahrstreifenwechsel, verschiedenen Ausprägungen des Verhaltensraums in den gewechselt wird und einem Fahrstreifenwechsel auf den ursprünglichen Fahrstreifen. Das Überholen stellt aufgrund der hohen Anzahl an Variablen ein sehr komplexes Verhalten dar. So ist es möglich, dass bei dem ersten Fahrstreifenwechsel eine Fremddreservierung des lateral angrenzenden Verhaltensraums besteht, da die Referenzrichtung entgegengesetzt zur Richtung des Egofahrzeugs festgelegt ist. Es ist jedoch auch möglich, dass dieser Fahrstreifen eigen- oder fremddreserviert ist. Aufbauend auf den Anforderungen, die für einen grundsätzlichen lateralen Verhaltensraumwechsel vorhanden sind, entstehen weitere Anforderungen aufgrund der möglichen Fremddreservierung des angrenzenden Verhaltensraums. Es darf kein Verkehrsteilnehmer mit Reservierungsrecht dort in seiner Fahrt behindert werden. Diese Forderung ist bei der Planung des Verhaltens und der Trajektorie zu berücksichtigen. Des Weiteren ist es notwendig, dass bei der Rückkehr auf den eigenen Fahrstreifen die Bedingungen erfüllt werden, um diesen Wechsel durchführen zu dürfen. Hier existieren die gleichen Bedingungen wie bei einem klassischen Fahrstreifenwechsel. Eine Überprüfung, ob ein generelles Überholverbot besteht, ist in der Regel nicht notwendig, da dieses Überholverbot durch die lateralen Verhaltensraumgrenzen durchgesetzt wird.

Aus Sicht der Trajektorienplanung gelten hier ebenfalls weitere Anforderungen. So ist es notwendig, eine Trajektorie mit ausreichend lateralem und longitudinalen Abstand zu dem Fahrzeug zu halten, das überholt wird. Außerdem besteht die Anforderung, dass der longitudinale Abstand während des Überholmanövers gegenüber möglicherweise entgegenkommenden Verkehrsteilnehmern

ausreichend ist, um keine Gefährdung des Straßenverkehrs zu erzeugen und diesen Verkehrsteilnehmer nicht in seiner Fahrt zu behindern.

Durch die Dekomponierung des Verhaltens nach BSSD ist es möglich, dass ein Teil der Anforderungen, die bei einem Überholmanöver entstehen, schon zuvor überprüft wurden. Daher ist eine Neuformulierung dieser Anforderungen bei einem Überholmanöver nicht notwendig. Dieses Beispiel zeigt einen der wesentlichen Vorteile von BSSD auf. Die einzelnen Manöver besitzen Schnittmengen, was ihre Verhaltensanforderungen nach BSSD betrifft. Auf Basis der Hypothese, dass es ausreichend ist, Verhaltensanforderungen einzeln zu überprüfen und es nicht notwendig ist, diese mehrfach in verschiedenen Situationen zu testen, besteht das Potenzial, dass der Freigabeaufwand für die Verhaltens- und Trajektorienplanung erheblich reduziert wird. Daher wird diese Arbeitshypothese in Kapitel 4.2 weiter analysiert.

Abbildung 4-7 stellt innerhalb von drei Schritten den Ablauf eines Überholmanövers inklusive Fahrstreifenwechsel dar. Dabei existieren zwei andere Verkehrsteilnehmer, die sich entlang ihrer Referenzrichtung bewegen. Es wird ersichtlich, dass der Verkehrsteilnehmer, der in Richtung des Egofahrzeugs fährt, eine niedrigere Geschwindigkeit besitzt und es dadurch möglich ist, ihn zu überholen. In dem Verhaltensraum mit Referenzrichtung entgegen des Egofahrzeugs befindet sich ein weiterer potenzieller Verkehrsteilnehmer, der für die Verhaltens- und Trajektorienplanung ebenfalls relevant ist.

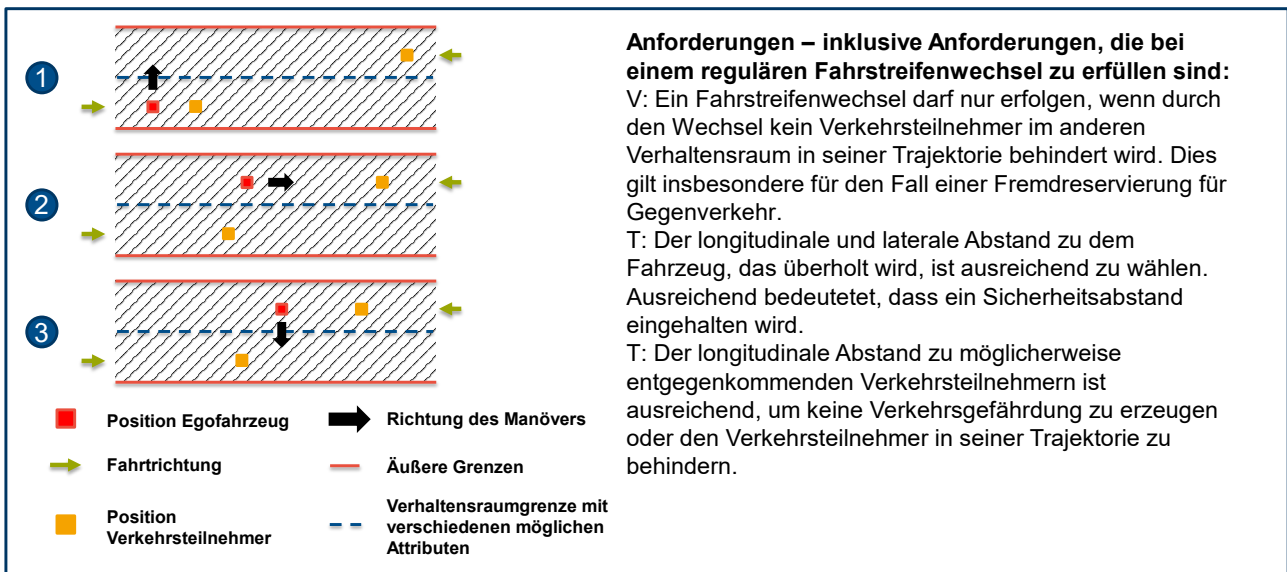


Abbildung 4-7: Anforderungen zum Verhalten „Überholen mit Fahrstreifenwechsel“

Reagieren auf Verkehrsschilder

Das Reagieren auf Verkehrsschilder verläuft in einem mehrschrittigen Prozess. Es ist möglich diesen Prozess auf unterschiedliche Art und Weise umzusetzen. So besteht der Anspruch von Lanelet2, dass alle Verkehrsschilder beziehungsweise ihre Bedeutungen im Kartenmaterial enthalten sind. Auf dieser Basis ist es dann für die Verhaltens- und Trajektorienplanung möglich, entsprechend zu reagieren. Dies stellt auch die Grundlage der Planung dar, die beispielsweise aufgrund der Eintragung eines

Stoppschild in der Karte ein Haltemanöver an der entsprechenden Haltelinie vorgibt. Dieser Prozess stellt auch die besondere Relevanz von hochakkuraten Karten dar.

Es ist möglich, Schilder mit direkten Implikationen für das Verhalten in drei Kategorien einzuteilen. Dies sind zum einen Schilder, die den Vorrang in einer Verkehrssituation festlegen. Zudem existieren Schilder, die den Verkehrsfluss regeln und es existieren Schilder, um Zugangsbeschränkungen zu kennzeichnen. Gefahrenschilder hingegen sind Ausdruck einer folgenden Verkehrssituation, die auch durch das Kartenmaterial dargestellt wird. Dementsprechend ist es nicht zwingend notwendig, diese in dieser Kategorie mitzubedenken, da die Verkehrssituationen, die sie markieren anderweitig überprüft werden.

Schilder, die den Vorrang in einer Verkehrssituation festlegen, sind beispielsweise das Vorschriftzeichen „Vorfahrt gewähren“ (StVO Nr. 205) oder „Vorfahrtsstraße“ (StVO Nr. 306). Daneben gilt das klassische Stoppschild (StVO Nr. 206) auch als Vorschriftzeichen, da es impliziert, dass eine Vorfahrt gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern zu gewähren ist. In BSSD wird die Vorfahrt anderer Verkehrsteilnehmer dadurch markiert, dass der folgende VHR extern reserviert ist. Zusätzlich wird die Klasse der Verkehrsteilnehmer spezifiziert sowie die Richtung, aus der sie stammen. Die Anforderung an die Verhaltensplanung besteht hierbei darin, dass nur ein temporärer Aufenthalt in diesem Bereich geplant wird sowie der Aufenthalt in solch einem Bereich nicht dazu führen darf, dass Verkehrsteilnehmer mit Reservierungsrecht in ihrer Trajektorie behindert werden. Diese Anforderung besitzt für beliebige Vorschriftzeichen Gültigkeit, wenn diese eine Fremdreseverierung einleiten. Bei einem Stoppschild wird in BSSD zusätzlich eine Bedingung für die Verhaltensraumgrenze in longitudinaler Richtung eingeführt. Diese markiert, dass ein vollständiges Anhalten notwendig ist, um die Verkehrsregeln zu befolgen. Dementsprechend besteht eine weitere Anforderung an die Verhaltensplanung darin, dass ein vollständiger Halt bei diesem Vorschriftzeichen geplant wird. Die Trajektorienplanung ist dafür verantwortlich, dass das geplante Verhalten korrekt umgesetzt wird. Daher besteht aus Sicht der Trajektorienplanung eine Anforderung darin, dass eine Trajektorie geplant wird, die einen ausreichenden Abstand zu Verkehrsteilnehmern mit Reservierungsrecht besitzt. Zusätzlich besteht eine Anforderung an die Trajektorienplanung darin, dass ein Halteverhalten so umgesetzt wird, dass es tatsächlich zu einem Stillstand an der korrespondierenden Haltelinie kommt. Bei einer eigenen Vorfahrt ist ein Hineinfahren in den nächsten Verhaltensraum grundsätzlich nicht mit weiteren Anforderungen verbunden.

Abbildung 4-8 stellt eine Vorfahrtssituation mit einer Stoppbedingung dar. Der rot markierte Bereich dient dazu, eine Fremdreseverierung darzustellen. Es ist bewusst kein *Reservation Link* eingefügt, da dieser an beliebiger Position bestehen kann. Aufgrund der Stoppbedingung ist es notwendig, dass das Egofahrzeug zu einem vollständigen Halt kommt, bevor es in den VHR einfährt. Im Text darunter sind die Anforderungen gesammelt, die generell bei Vorschriftzeichen gelten, falls eine Fremdreseverierung des folgenden Verhaltensraums existiert.

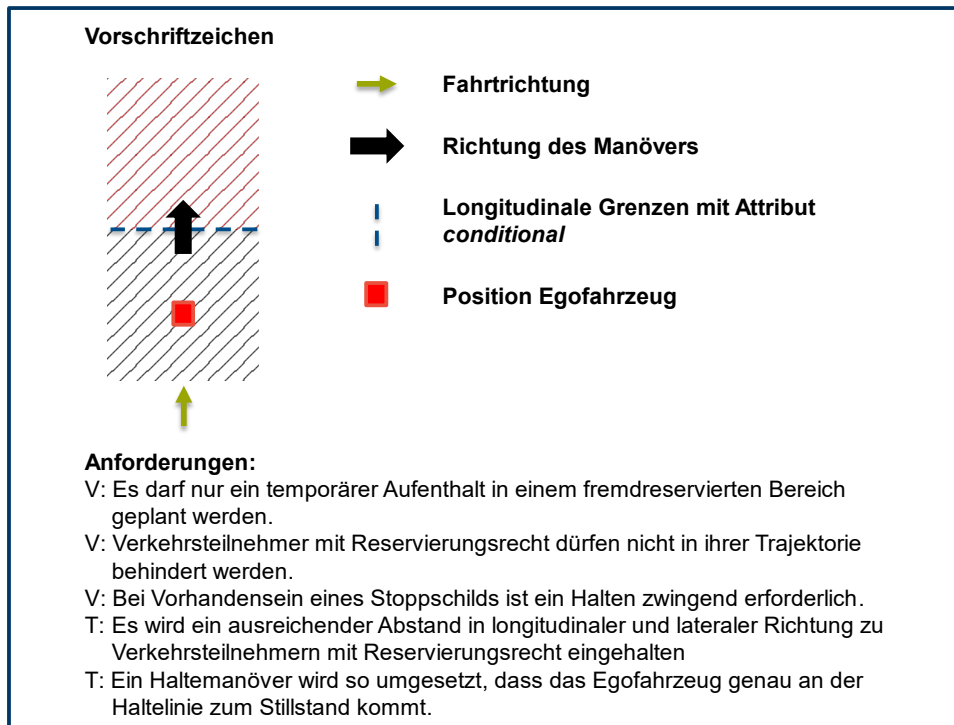


Abbildung 4-8: Anforderungen zum Verhalten bei Vorschriftzeichen

Eine Regelung des Verkehrsflusses entsteht durch die Nutzung von Geschwindigkeitsbegrenzungen. In BSSD wird diese Begrenzung durch das Verhaltensattribut *speed* dargestellt. Die Einhaltung der Geschwindigkeitsbegrenzungen stellt eine Anforderung an die Trajektorienplanung dar, weil diese für die Bestimmung der Zeit-Weg Linie verantwortlich ist. Bei der Einhaltung dieser Verkehrsregel ist die Verhaltensplanung nicht involviert, da ihr Aufgabenbereich nicht darin besteht, konkrete Geschwindigkeitsvorgaben zu planen. Abbildung 4-9 stellt die Anforderungen dar, die durch eine Geschwindigkeitsbegrenzung entstehen.

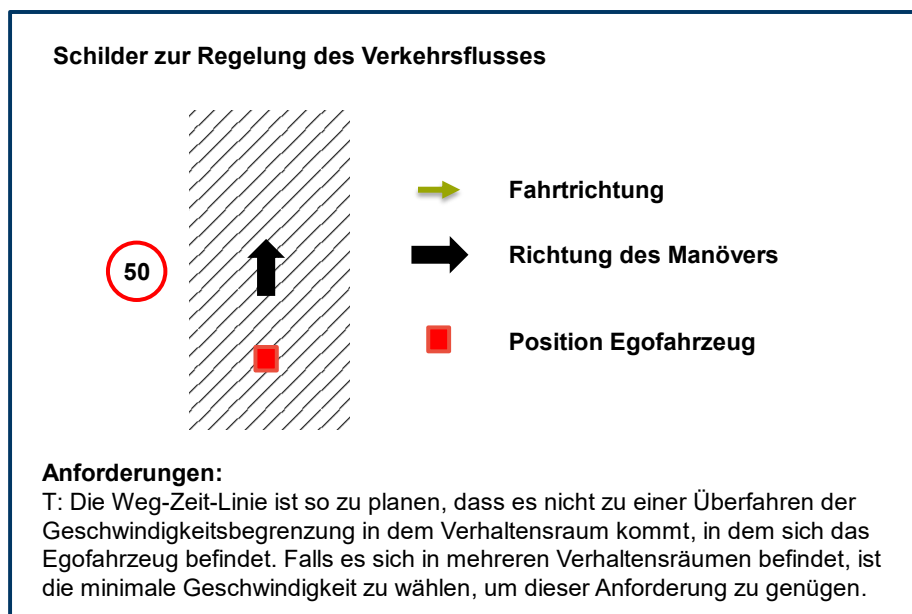


Abbildung 4-9: Anforderungen zum Verhalten bei Verkehrsflusszeichen

Die dritte Kategorie von Verkehrsschildern markiert Zugangsbeschränkungen. Darunter fallen Schilder zum Markieren von Einbahnstraßen oder Schilder, die einen Eintritt nur für bestimmte Fahrzeuge oder unter gewissen Bedingungen erlauben. In BSSD werden diese Beschränkungen unterschiedlich dargestellt. So werden Beschränkungen für gewisse Nutzergruppen oder aufgrund von äußeren Umständen durch das Attribut *Conditional* für longitudinale Verhaltensraumgrenzen ausgedrückt. Fahrten in Einbahnstraßen werden durch das Attribut *Prohibited* für die longitudinale Verhaltensraumgrenzen bei der Einfahrt in eine Einbahnstraße gekennzeichnet. Für die Verhaltensplanung ist erforderlich, dass solche Attribute vor einem Übergang in einen anderen Verhaltensraum überprüft werden, um sicherzustellen, dass eine Einfahrt rechtmäßig ist. Falls die Bedingungen nicht erfüllt werden oder es verboten ist, in diesen Verhaltensraum einzufahren, darf die Verhaltensplanung eine Einfahrt nicht planen. Aus Sicht der Trajektorienplanung besteht die Anforderung, dass keine Wegpunkte in Bereichen geplant werden dürfen, in denen eine Einfahrtsbeschränkung durch das Egofahrzeug oder andere Umstände nicht erfüllt wird. Wichtig ist, dass solche Zufahrtsbeschränkungen teilweise nur für bestimmte Fahrstreifen gelten. In diesem Fall ist es auch notwendig, dass bei einem lateralen Wechsel diese Bedingungen berücksichtigt werden. Im Wesentlichen besteht hier aber eine Anforderung gegenüber der Verhaltensplanung, da diese entscheidet, ob eine Einfahrt in diesen Bereich angestrebt wird und die Trajektorienplanung anschließend die Umsetzung durchführt.

Abbildung 4-10 stellt die verschiedenen Ausprägungsmöglichkeiten bei Zufahrtsbeschränkungen dar. Des Weiteren wird festgehalten, dass bei solchen Zufahrtsbeschränkungen im Wesentlichen nur eine Anforderung an die Verhaltensplanung gestellt wird, da hieraus sich das Verhalten der Trajektorienplanung ableitet. Das bedeutet, dass wenn die Anforderung durch die Verhaltensplanung erfüllt wird, auch keine Regelverletzung durch die Trajektorienplanung entsteht.

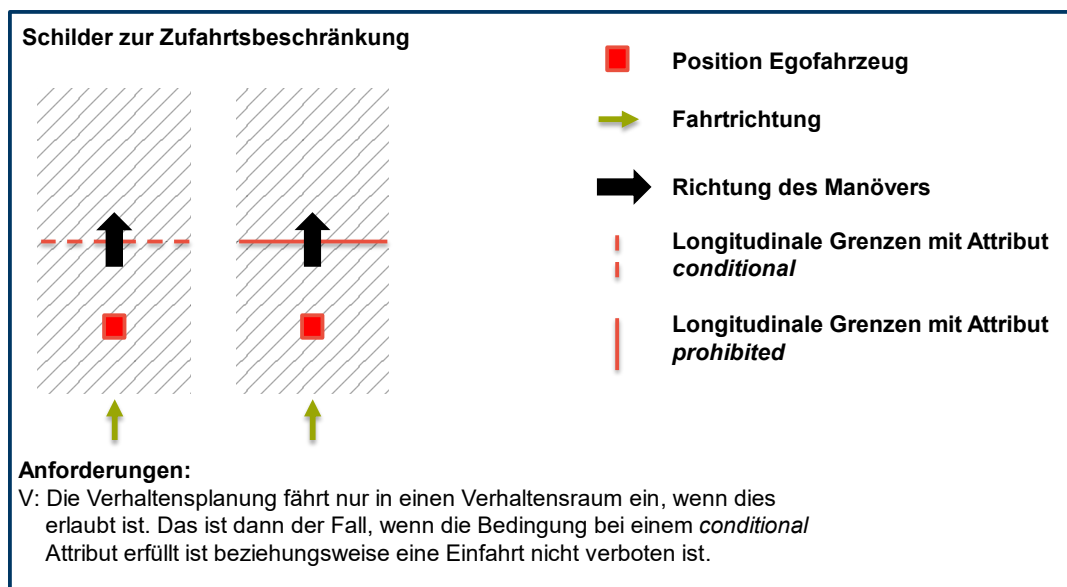


Abbildung 4-10: Anforderungen zum Verhalten bei Zufahrtsbeschränkungen

Vorfahrtsregeln

Vorfahrtsregeln werden in BSSD generell durch die Nutzung des Attributs *Reservation Type* dargestellt. Dadurch ist es möglich, viele verschiedene Vorfahrtssituationen zu modellieren. Dabei

entstehen beispielsweise bei einer Rechts-vor-Links Regelung an einer Kreuzung keine anderen Verhaltensanforderungen im Vergleich zu einer Regelung durch Vorschriftzeichen. Daher ist es für diese Situationen nicht notwendig, weitere Anforderungen zu definieren. Dies stellt einen der großen Vorteile von BSSD dar. Durch die Extraktion von Anforderungen aus einer Szenerie werden viele Gemeinsamkeiten unterschiedlicher Szenerieentwürfe entdeckt und resultieren in einer geringeren Menge an abzuprüfenden Szenerien. Dieser Vorteil ist jedoch nur aufgrund des modularen Aufbaus von UNICAR^{agil} nutzbar. Dass die Verhaltens- und Trajektorienplanung nicht für die Interpretation von Verkehrssituationen verantwortlich ist, ermöglicht die Zusammenfassung von Szenerien mit denselben Verhaltensanforderungen.

Fahrstreifenwechsel bei zusammenführenden Fahrstreifen

Eine Fahrstreifenverengung beziehungsweise -verringering wird in BSSD dadurch gekennzeichnet, dass ein endender Fahrstreifen durch die äußere laterale Verhaltensraumgrenze abgeschlossen wird. Dadurch erhält der VHR eine abweichende Geometrie im Vergleich zu anderen Verhaltensräume. Die Breite des VHR, der die Verengung darstellt, nimmt zum Ende des VHR hin ab. Diese abschließende laterale Verhaltensraumgrenze besitzt den *Crossing Type prohibited*, da ein Kreuzen dieser Grenze aufgrund der Fahrstreifenverengung nicht erlaubt ist. Daher entsteht hier die Anforderung an die Verhaltensplanung, dass sie diese äußere laterale Grenze nicht überfahren darf. Bis auf diese weitere Anforderung existieren die Anforderungen an die Verhaltensplanung, die bei einem Fahrstreifenwechsel entstehen.

Es ist unter Umständen aufgrund eines Abbremsens am Fahrstreifenende schwieriger, den Fahrstreifen bei einer Verengung zu wechseln. Dies wird in den Anforderungen an die Trajektorienplanung reflektiert. Diese muss in der Lage sein, auch bei hohen Geschwindigkeitsunterschieden zwischen den Verkehrsteilnehmern, eine Weg-Zeit-Linie zu finden, die einen ausreichenden Abstand in lateraler und longitudinaler Richtung zu anderen Verkehrsteilnehmern besitzt.

Abbildung 4-11 stellt solch eine Situation mit einem endenden Fahrstreifen dar. Die dort genannten Anforderungen stellen Anforderungen dar, die von der Verhaltens- und Trajektorienplanung zusätzlich zu einem regulären Fahrstreifenwechsel zu erfüllen sind. In diesem Fall beinhaltet die Abbildung keine Geschwindigkeitsvektoren. Durch eine Variation der relativen Geschwindigkeit zwischen dem Egofahrzeug und einem benachbarten Verkehrsteilnehmer ergeben sich unterschiedliche Situationen, die durch die Trajektorienplanung bewältigt werden müssen.

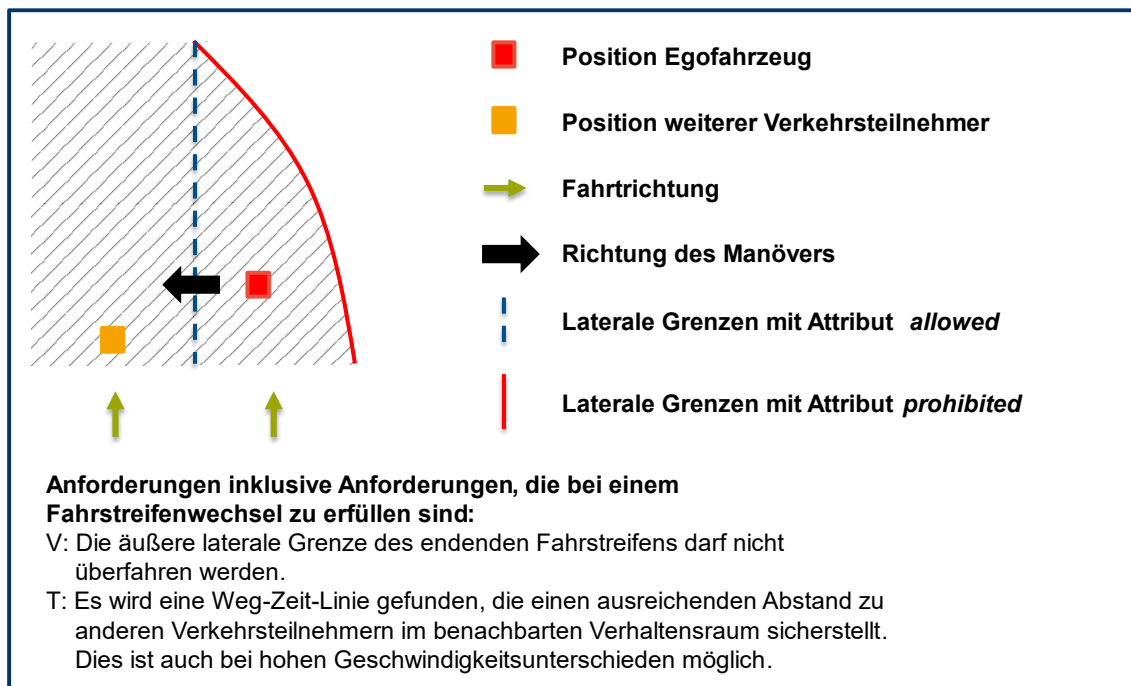


Abbildung 4-11: Anforderungen bei einem Fahrstreifenwechsel und Fahrstreifenverringern

Befahren eines Fußgängerüberwegs

Ein Fußgängerüberweg wird in BSSD durch einen extern reservierten Bereich (*Reservation Type: Externally-Reserved*) verbunden mit einer Reservierung durch Fußgänger dargestellt. Zusätzlich werden *Reservation Links* verwendet, um zu kennzeichnen aus welcher Richtung die Fußgänger möglicherweise kommen.

Eine Anforderung an die Verhaltensplanung besteht darin, dass an einem Fußgängerüberweg gehalten wird, falls sich darauf Fußgänger befinden oder im Begriff sind, diesen zu überqueren. Diese Verkehrsteilnehmer dürfen nicht in ihrer Trajektorie behindert werden, was eine übliche Anforderung bei extern reservierten Bereichen ist. Laut StVO §26 ist zudem notwendig, dass der Bereich nach dem Fußgängerüberweg für das Egofahrzeug frei ist, sodass es nicht den Fußgängerüberweg blockiert⁷⁶. Daher darf die Verhaltensplanung eine Einfahrt nur planen, wenn der nachfolgende Bereich nicht blockiert ist.

Durch die besondere Schutzbedürftigkeit von Fußgängern ist es wichtig, dass das Egofahrzeug seine Trajektorie so plant, dass ein ausreichender Abstand zu Fußgängern gesichert ist. Zudem wird gesetzlich in StVO §26 festgelegt, dass ein sich näherndes Fahrzeug durch seine Fahrweise einem Fußgänger zu signalisieren hat, dass es Vorfahrt gewähren wird⁷⁶. Das bedeutet, dass die Trajektorie mit einer frühzeitigen Längsverzögerung geplant wird.

Abbildung 4-12 stellt solch eine Situation dar. Die Fremdreservierung wird durch den rot markierten Bereich dargestellt. Dort sind die potenziell relevanten Positionen für verschiedene Verkehrsteilnehmer markiert. Oftmals ist es im Straßenverkehr schwierig abzuschätzen, wie sich ein

⁷⁶ Bundesministerium für Justiz: Straßenverkehrsordnung.

Verkehrsteilnehmer bewegt. Daher besteht auch bei einer geringen Wahrscheinlichkeit, dass ein Fußgänger den Überweg betritt, die Anforderung, dass das Egofahrzeug vor dem Überweg hält. Zusätzlich ist ein weiterer Verkehrsteilnehmer dargestellt, der potenziell den nachfolgenden Verhaltensraum blockiert.

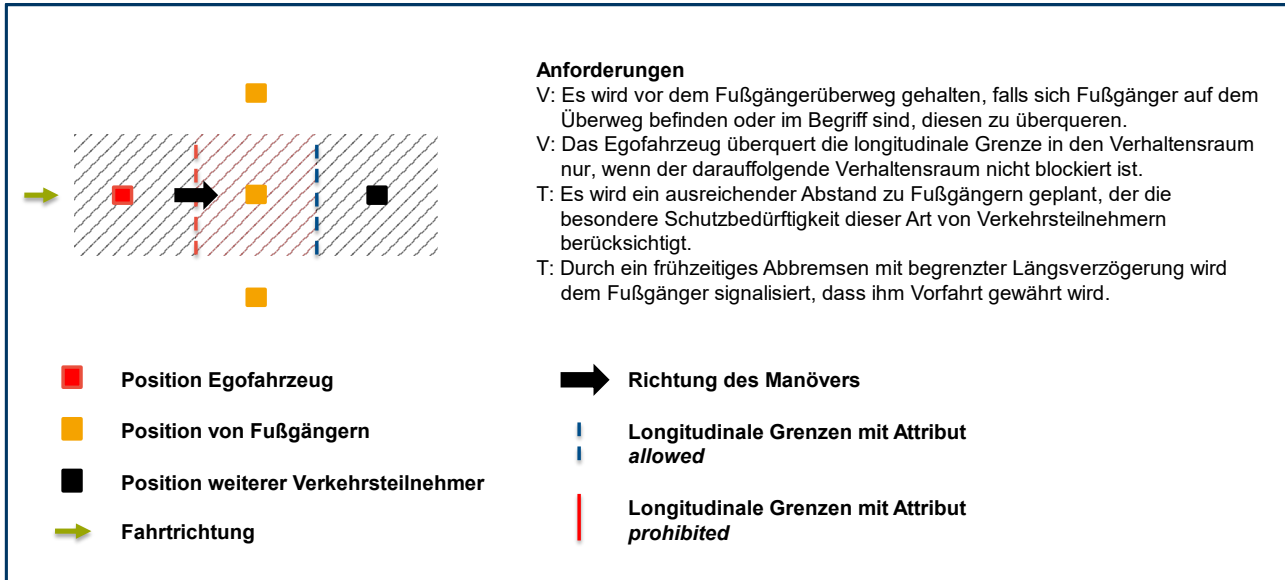


Abbildung 4-12: Anforderungen beim Überqueren eines Fußgängerüberwegs

Überholen auf dem eigenen Fahrstreifen

Ein Überholen auf dem eigenen Fahrstreifen ist dann möglich, wenn das Egofahrzeug eine höhere Geschwindigkeit als der vordere Verkehrsteilnehmer besitzt. Zudem besteht die Bedingung, dass solch ein Überholmanöver nicht verboten ist. In BSSD wird diese Bedingung durch das Verhaltensattribut *Overtake* gekennzeichnet. Dementsprechend wird von der Verhaltensplanung gefordert, dass solch ein Manöver nur dann durchgeführt wird, wenn entlang des gesamten Wegs des Überholmanövers das Attribut *Overtake* mit dem Wert *Yes* belegt ist und somit ein Überholen erlaubt ist. Diese Anforderung berücksichtigt den Fall, dass während eines Überholmanövers ein Wechsel dieser Regel möglich ist. Dadurch dass bei diesem Manöver im eigenen Verhaltensraum beziehungsweise in einem Fahrstreifen verblieben wird, sind keine weiteren Anforderungen einzuführen.

Aus Sicht der Trajektorienplanung ist es notwendig, dass bei einem Überholen auf dem eigenen Fahrstreifen ausreichend Abstand zu dem Element gehalten wird, das überholt wird. Der notwendige Abstand ist teilweise gesetzlich vorgeschrieben. Bei Fahrradfahrern beträgt dieser beispielsweise 1.5 m⁷⁷. Daneben ist die Trajektorienplanung dafür zuständig, eine Trajektorie zu planen, bei der die Dauer des Überholvorgangs im Rahmen der Geschwindigkeitsbegrenzungen des Verhaltensraums minimiert wird.

Abbildung 4-13 stellt die mögliche Trajektorie solch eines Überholmanövers auf abstrakter Ebene dar. Es wird angenommen, dass in dem Beispiel ein VHR besteht, indem das *Overtake* Attribut mit

⁷⁷ Bundesministerium für Justiz: Straßenverkehrsordnung, §5

dem Wert *Yes* belegt ist. Die relative Geschwindigkeit der Fahrzeuge ist variabel, sodass es notwendig ist, dass die Planung diesen Geschwindigkeitsunterschied berücksichtigt.

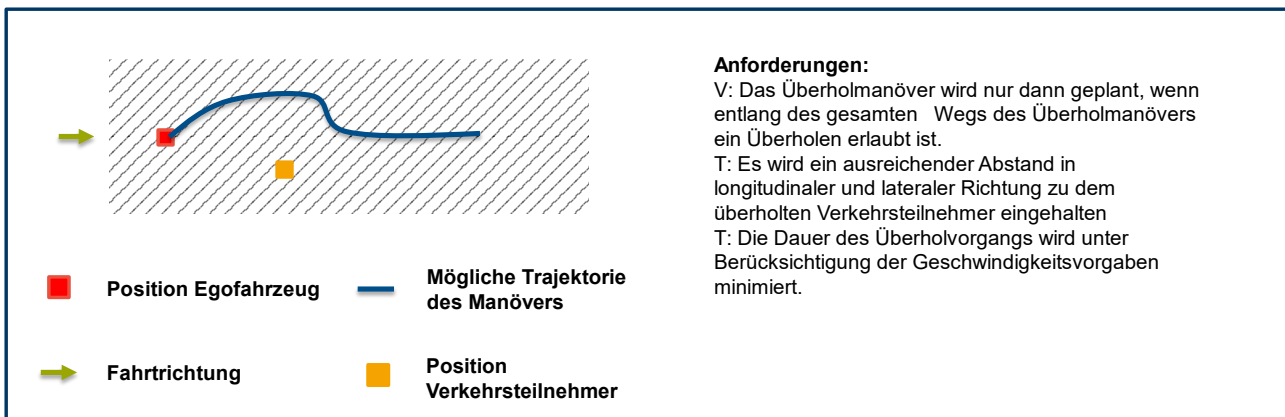


Abbildung 4-13: Anforderungen bei Überholen auf dem eigenen Fahrstreifen

4.3 Potentialanalyse von BSSD

Bevor eine Methodik zur urbanen Szenarioerzeugung auf Basis von BSSD entwickelt wird, ist es notwendig, zu überprüfen, ob sich BSSD als solches dafür eignet. Dafür werden zwei Hypothesen aufgestellt, deren Erfüllung notwendig ist, um eine solche Eignung zu besitzen:

- 1.) *BSSD ist in der Lage, die Verhaltensanforderungen von Szenarien innerhalb einer urbanen Umgebung zu dekomponieren beziehungsweise auf einer abstrakten Ebene darzustellen.*
- 2.) *Es ist im Rahmen von UNICARagil möglich, die Verhaltens- und Trajektorienplanung durch einen szenariobasierten Ansatz unter Nutzung von BSSD effizient zu validieren.*

Diese Hypothesen zielen auf die Grundsätze eines Testkonzepts nach Winner et al. ab: Effektivität und Effizienz⁷⁸. Nur wenn die Szenerieausprägungen vollständig durch eine Methodik repräsentiert werden, ist eine vollständige Prüfung des Verhaltens des Egofahrzeugs möglich. Daneben existiert durch BSSD möglicherweise ein Konzept, um dieses Modul effizienter zu validieren.

4.3.1 Verhaltensanforderungen nach BSSD in einer urbanen Szenerie⁷⁹

In Kapitel 4.2 wurden bereits die Verhaltensanforderungen bei verschiedenen Manövern und verschiedenen Verkehrsregeln in einer urbanen Szenerie auf Grundlage von BSSD dargestellt. Damit es möglich ist, funktionale Szenarien mit dem BSSD-Konzept aufzubauen, ist es notwendig, zu überprüfen, ob alle Elemente der Szenerie durch BSSD dargestellt werden.

Als Orientierung für diese Vollständigkeitsprüfung dient der Szeneriekatalog von Geyer. Darin wurde methodisch der Aufbau von Szenarien analysiert und anschließend durch Videodaten aus Messfahrten validiert. Der Katalog umfasst vier verschiedene Klassen. Diese sind Kreuzungen, Kreisverkehre,

⁷⁸ Winner, H.; Wachenfeld, W.: Die Freigabe des autonomen Fahrens.

⁷⁹ Geyer, S.: Diss., Manöverbasierte Fahrzeugführung (2013).

Querverkehr und Längsverkehr. Innerhalb der einzelnen Klassen existieren verschiedene Ausprägungen, die den genauen Aufbau definieren. Nur ein begrenzter Teil dieser Ausprägungen hat wiederum Auswirkungen auf die Verhaltensanforderungen, die an das Egofahrzeug gestellt werden. Der Längsverkehr bezeichnet dabei Streckenabschnitte für motorisierte Fahrzeuge ohne das Hinzukommen anderer Verkehrsteilnehmer. Die Darstellungen dieser Bereiche wurde bereits im Wesentlichen durch die Beschreibung von BSSD Attributen in Kapitel 2.4.2 umgesetzt.

Kreuzungen

Aus Sicht der Verhaltensanforderungen bestehen Kreuzungen generell aus drei verschiedenen Bereichen. Dies sind die Kreuzungseinfahrt, die Kreuzungsdurchfahrt sowie die Kreuzungsausfahrt. Dabei bestehen nach BSSD die Kreuzungseinfahrt und -ausfahrt jeweils aus einem Segment, während die Kreuzungsdurchfahrt aus beliebig vielen Segmenten bestehen kann. Die Kreuzungseinfahrt und -ausfahrt besitzen entweder den *Reservation Type Own-Reserved* oder *Equally-Reserved*, falls es sich um eine mit den Verkehrsregeln konforme Verhaltensraumsequenz handelt. Eine Eigenreservierung besteht dann, wenn für beide Richtungen an einem Kreuzungsarm Fahrstreifen existieren. Falls dies nicht der Fall ist, wird eine geteilte Reservierung für Verkehrsteilnehmer aus beiden Richtungen kommend angenommen. Des Weiteren ist es möglich, dass bei einer nicht regelkonformen Sequenz die Kreuzungseinfahrt oder Kreuzungsausfahrt aus einem extern reservierten Bereich besteht. Dies ist dann der Fall, wenn das Egofahrzeug eine Einbahnstraße in die falsche Richtung befährt. Der Durchfahrtsraum ist entweder eigenreserviert, wenn eine eigene Vorfahrt besteht oder fremdreserviert, falls ein Verkehrsteilnehmer oder mehrere Verkehrsteilnehmer aus einer anderen Richtung kommend Vorrang besitzen. Dabei bestimmen Vorschriftzeichen den Reservierungstyp des folgenden VHR.

Bei LSA differenziert Geyer zwischen einer Signalisierung für alle Abbiegemöglichkeiten und einer individuellen Signalisierung. Diese Differenzierung wird in BSSD ebenfalls festgehalten. Dies geschieht durch ein zusätzliches Attribut von Reservierungen mit der Bezeichnung *turn_arrow_active*. Eine weitere Möglichkeit, die in Kombination mit LSA besteht, ist die Nutzung des Grünpfeilschildes (StVO Nr. 720). Dieser zeigt an, dass es bei einem roten Signal zulässig ist, rechts abzubiegen. Dies ist jedoch damit verbunden, dass der Abbiegebereich für diesen Fall fremdreserviert ist.

Für die Verhaltensraumgrenzen in longitudinaler Richtung besteht in den meisten Fällen an der Grenze zwischen Einfahrt und Durchfahrt der *Crossing Type Conditional*. Mindestens das Attribut *no_stagnant_traffic* besteht für diesen Regelfall dann als Bedingung. Dieses Attribut beschreibt die Anforderung, dass Kreuzungsbereiche freigehalten werden. Falls sich ein Verkehrsteilnehmer auf der Kreuzung oder im Bereich nach der Kreuzung die Weiterfahrt blockiert, darf ein Verkehrsteilnehmer auch bei eigener Vorfahrt nicht in die Kreuzung einfahren. Dies ist der Regelfall. Ex existiert jedoch eine Ausnahme, die in der von Geyer als T-Kreuzung bezeichneten Szenerie besteht. Falls hier alle drei Arme Einbahnstraßen repräsentieren, besteht die Verhaltensanforderung nicht und ein „Einfädeln“ in den Kreuzungsverkehr ist erlaubt. Weitere Ausprägungen von Verhaltensraumgrenzen in longitudinaler Richtung aufgrund von Vorschriftzeichen wurden bereits in Kapitel 4.2 dargestellt.

Des Weiteren ist es notwendig, die möglichen Varianten von lateralen Verhaltensraumgrenzen für die einzelnen Bereiche zu bestimmen. So ist der Bereich kurz vor der Kreuzung durch durchgezogene

Fahrstreifengrenzen markiert. Das bedeutet, dass in diesem Segment der *Crossing Type Prohibited* auf beiden Seiten besteht. Im Durchfahrtsbereich einer Kreuzung ist ein Fahrstreifenwechsel grundsätzlich zulässig. Allerdings ist auch hier eine Bedingung zu beachten. Falls der benachbarte Fahrstreifen als longitudinale Verhaltensraumgrenze an seinem Eintritt den *Crossing Type Conditional* und der Spezifikation *no_stagnant_traffic* besitzt, werden die lateralen Verhaltensraumgrenzen hin zu diesem Verhaltensraum auch mit dem *Crossing Type Conditional* und der Spezifikation *no_stagnant_traffic belegt*. Die äußeren Verhaltensraumgrenzen, die nicht zu einem Verhaltensraumnachbar angrenzen, besitzen hingegen den *Crossing Type Prohibited*. Es ist nicht erlaubt, in diese Richtung den Verhaltensraum zu überqueren, da es sonst zu einem Zusammentreffen mit anderen Verkehrsteilnehmern im Kreuzungsbereich kommen kann. Der Bereich der Kreuzungsausfahrt besitzt für die inneren Verhaltensraumgrenzen in lateraler Richtung den *Crossing Type Allowed*. Für die äußeren Grenzen variiert die Verhaltensraumgrenze und hängt von der jeweiligen Bauart der Kreuzung ab. Daraus resultieren die möglichen *Crossing Types Prohibited* und *Not possible*.

Darüber hinaus differenziert Geyer, ob Abbiegestreifen für die einzelnen Richtungen vorhanden sind. Aus Sicht von Verhaltensanforderungen beziehungsweise aus Sicht von BSSD ist diese Differenzierung nicht relevant. Durch einen Abbiegestreifen beziehungsweise sein Nicht-Vorhandensein entstehen keinerlei neue Verhaltensanforderungen.

Eine weitere von Geyer genannte Ausprägung besteht in einer Wendefahrbahn. Da es in der Regel nur einen Wendestreifen gibt, besitzen die lateralen Verhaltensraumgrenzen des Durchfahrtsbereichs auf beiden Seiten den *Crossing Type prohibited*. Die Reservierung dieses Segments hängt davon ab, ob ein Rechtsabbiegen von der 90° gegenüberliegenden Kreuzung zeitgleich zulässig ist. Ist dies der Fall, besteht eine Fremdeservierung, dadurch dass rechtsabbiegende Verkehrsteilnehmer Vorrang besitzen. Ist dies nicht der Fall, ist das Durchfahrtssegment des Wendefahrstreifens eigenreserviert.

Kreisverkehr

Es existieren verschiedene Ausprägungen nach Geyer, die die Geometrie von Kreisverkehren beeinflussen. Die meisten dieser geometrischen Aspekte sind dabei vernachlässigbar, da sie keine weiteren Verhaltensanforderungen kreieren. Es ist jedoch auch aus Verhaltenssicht zwischen Kreisverkehren mit einem Fahrstreifen und mehreren Fahrstreifen innerhalb der Kreisfahrbahn zu differenzieren. Bei Kreisverkehren mit einem einzelnen Fahrstreifen besteht eine Verhaltensraumsequenz aus vier Bereichen. Diese werden in die Auffahrt, Einfahrt, Durchfahrt und Ausfahrt unterteilt. Diese Bereiche werden in Abbildung 4-14 dargestellt.

Die Reservierung der Verhaltensräume der Auffahrts- und Ausfahrtssegmente können dabei alle drei Typen annehmen (*Own-Reserved*, *Externally-Reserved*, *Equally-Reserved*). Zudem ist es möglich, dass diese Bereiche durch Fußgängerüberwege oder Fahrradwege unterbrochen werden, sodass Teile dieser Bereiche eine Fremdeservierung durch andere Typen von Verkehrsteilnehmern innehaben. Der Verhaltensraum der Kreisverkehreinfahrt besitzt eine Eigenreservierung oder ist extern reserviert, da Verkehrsteilnehmer, die sich bereits innerhalb des Kreisverkehrs befinden, Vorrang besitzen. Im Anschluss darauf folgt die Kreisverkehrdurchfahrt, die eine Eigenreservierung besitzt.

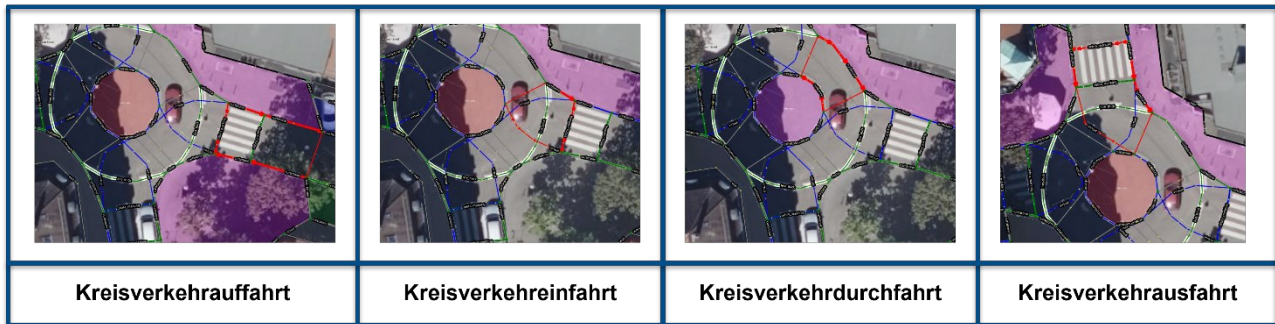


Abbildung 4-14: Visualisierung der Kreisverkehrsbereiche anhand einer BSSD-Karte^{80,81}

Die Vorfahrtsregelung innerhalb des Kreisverkehrs ist nach Geyer auf drei verschiedene Arten und Weisen gestaltbar. Die Vorfahrtsregelungen, dass Verkehrsteilnehmer innerhalb des Kreisverkehrs Vorfahrt besitzen bedeutet, dass die longitudinale Grenze des Verhaltensraums der Kreuzungseinfahrt den *Crossing Type Allowed* zugewiesen bekommt. Bei der Nutzung einer LSA wird wiederum, wie bei einer Kreuzung, der *Crossing Type Conditional* genutzt mit dem Verweis auf die Bedingung, dass das Zeichen der LSA eine Einfahrt gewährt. Des Weiteren ist es möglich, dass eine Rechts-vor-Links Regelung getroffen wird, sodass Verkehrsteilnehmer, die in die Kreuzung einfahren, ein Reservierungsrecht besitzen. Eine Einfahrt in diesen Verhaltensraum ist auch ohne weitere Bedingungen möglich. Die lateralen Grenzen bei Verhaltensräumen ohne benachbarten Verhaltensräume werden durch die Attribute *prohibited* oder *not possible* je nach Szenerieausführung festgelegt. Für den Fall, dass, wie von Geyer beschrieben, eine mehrstreifige Kreisverkehrsfahrbahn vorliegt, bestehen die Kreisverkehrsdurchfahrten aus mehreren lateral angrenzenden Segmenten, zwischen denen ein Wechsel erlaubt ist.

Querverkehr

Als Querverkehr bezeichnet Geyer Räume, die durch Fußgänger, Fahrradfahrer oder schienengebundene Fahrzeuge senkrecht zur Fahrtrichtung des motorisierten Verkehrs überquert werden. In BSSD sind diese Räume als eigenreservierte oder extern reservierte VHR mit einer Spezifikation für die jeweilige Art von Verkehrsteilnehmer markiert. Die Reservierung hängt von der Gestaltung des Vorrangs ab. Diese ist wiederum gleichzeitig mit der Art der longitudinalen Grenze verbunden.

Generell wird für alle longitudinalen Grenzen der *Crossing Type Conditional* festgelegt, da ein Blockieren des Überwegs durch das Egofahrzeug verboten ist und somit die Bedingung durch das Attribut *no_stagnant_traffic* weiter spezifiziert wird. Bei keiner weiteren Regelung des Vorrangs durch Verkehrselemente wird der Raum, den andere Verkehrsteilnehmer überqueren, als extern reserviert für das Egofahrzeug determiniert.

Falls eine LSA zur Vorrangsregelung genutzt wird, entsteht zusätzlich eine Spezifikation für LSA in BSSD. Dies bedeutet, dass der Verhaltensraum, den Fußgänger überqueren, für den Fall einer aktiven LSA eigenreserviert ist, da bei einem grünen Signal für das Egofahrzeug kein Vorrang gewährt

⁸⁰ Hildebrand, J.: Entwicklung eines Frameworks zur automatisierten Generierung der BSSD-Erweiterung für lanelet2-Karten (2022).

⁸¹ Microsoft Bing: BING Maps (2022).

werden muss. Geyer nennt eine weitere Möglichkeit zur Vorrangsregelung durch den Einsatz von Schranken an Bahnübergängen. Aus Verhaltenssicht entstehen dadurch jedoch keine weiteren Anforderungen, da diese laut Geyer immer in Kombination mit einer LSA genutzt werden. Daher orientiert sich die Vorrangsregelung weiterhin an den Regelungen für LSA. Es wäre jedoch perspektivisch möglich, ein weiteres Attribut für das Überqueren dieser Verhaltensraumgrenze einzuführen, um einen Fall abzudecken in dem die LSA ausfällt bei gleichzeitigem Funktionieren der Schranke.

Evaluation der Hypothese

Der Szenariokatalog von Geyer dient als eine erste Orientierung dazu, einzuschätzen inwiefern es möglich ist, durch BSSD eine Szenerie in einem urbanen Umfeld zu dekomponieren. Unter der Einschränkung, dass dieser Katalog genutzt wird, behält die erste Hypothese zur Effektivität von BSSD Bestand und wird nicht falsifiziert⁸². Nach Popper und Keuth darf dann von einer sich bewährten Hypothese gesprochen werden, wenn „sie eingehenden und strengen Nachprüfungen standhält und durch die Entwicklungen der Wissenschaft nicht überholt wird“⁸³. Um dieses Kriterium zu erfüllen bedarf es allerdings einer umfassenderen Prüfung, sodass nur von einem Bestandhalten gesprochen wird. Dies reicht jedoch aus, um auf BSSD aufbauend eine Methodik für die Szenariogenerierung zu entwickeln, wenn sich die zweite Hypothese auch als Bestand haltend erweist.

4.3.2 Vorläufige Bewertung des Effizienzpotenzials von BSSD

Um das Effizienzpotenzial von BSSD bewerten zu können, ist es notwendig, einen Referenzaufwand festzulegen. In den in Kapitel 2 betrachteten ontologiebasierten Ansätze zur Generierung von Szenarien besteht der Ansatz darin, dass in einem ersten Schritt die Szenerie auf Basis verschiedener Kategorien vollständig dargestellt wird. Durch die Nutzung statistischer Methoden wird der Parameterraum erst spät im Prozess reduziert. Diese Methodiken, sämtliche Ausprägungen von Szenarien vollständig darstellen zu wollen, wird daher als Referenzaufwand herangezogen.

Durch das Abtesten eines einzelnen Moduls bietet es sich an, BSSD als Grundlage für die Testumgebung zu nutzen. Ein Ziel des Einsatzes von BSSD als Basis für die Szenariogenerierung besteht darin, dass hiermit ein Maßstab erstellt wird, um festzulegen ab wann eine Anforderung als erfüllt gilt und Szenarien als bewältigbar gelten. Dadurch, dass BSSD Verhaltensanforderungen aus einer Szenerie extrahiert, ist es möglich, Gemeinsamkeiten zwischen verschiedenen Szenarien zu identifizieren. Dafür wird der Begriff von Anforderungsmengen im Kontext der Verhaltens- und Trajektorienplanung eingeführt. Sie werden wie folgt definiert:

Anforderungsmengen repräsentieren eine Kombination aus BSSD-Attributen, die aus der Szenerie bei dem Befahren einer Verhaltensraumsequenz extrahiert werden. Eine Verhaltensraumsequenz besteht aus der Fahrt durch mindestens einen Verhaltensraum. Anforderungsmengen repräsentieren jedoch nicht zwingend alle BSSD-Attribute, die während dieser Sequenz extrahiert werden.

⁸² Popper, K. R.: The Logic of scientific discovery (2008).

⁸³ Keuth, H.: Karl Poppers „Logik der Forschung“ (2019).

Beispielsweise ist es möglich, dass nur longitudinale Grenzen und externe Reservierungen betrachtet werden. Anforderungsmengen werden genutzt, um reale Szenarien zu gruppieren

Im Rahmen dieser Arbeit werden verschiedene Anforderungsmengen erstellt, um das Potenzial einer effizienten Absicherung durch eine Szenariogenerierung auf Basis von BSSD herauszustellen. Durch einen Übergang zwischen Verhaltensräumen entstehen Verhaltensanforderungen. Dieser Übergang erfolgt in lateraler oder longitudinaler Richtung. Wesentliche Faktoren, um diese Übergänge nach BSSD zu kategorisieren, sind die Wechsel der Reservierungstypen zwischen den beiden VHR sowie den *Crossing Type* der zu überquerenden Verhaltensraumgrenze. Eine Zuordnung von verschiedenen Szenarien entlang Ausprägungen des *Crossing Types* und *Reservation Types* ist in Anhang A dargestellt. An dieser Stelle wird eine Anforderungsmenge und die damit verbundenen Szenarien dargestellt, um das Potenzial von BSSD aufzuzeigen.

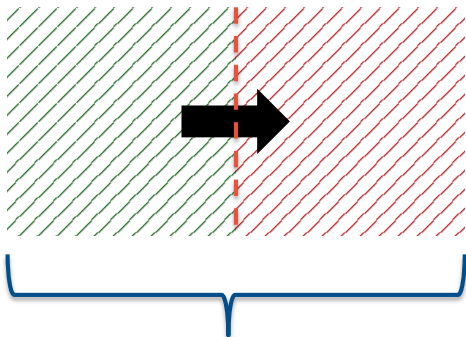
In Abbildung 4-15 werden zwei Übergänge von Verhaltensräumen mit dem dazugehörigen *Crossing Type* dargestellt. Zum einen ist dies ein Übergang vom eigenreservierten in den fremdreservierten Bereich und zum anderen ein Übergang von einem eigenreservierten Verhaltensraum in einen weiteren eigenreservierten Raum. Diese Wechsel entsprechen Anforderungen an das Verhalten des Egofahrzeugs. Gleichzeitig beinhaltet Abbildung 4-15 verschiedene Szenarien, die solch einem Übergang entsprechen. Auch wenn die *Condition* Attribute variieren, besteht dieselbe Grundanforderung. Das Egofahrzeug darf nur in den Verhaltensraum bei Erfüllen einer spezifizierten Bedingung einfahren. Des Weiteren ist in dem Zielverhaltensraum bei Fremdreservierung jeweils einem anderen Verkehrsteilnehmer Vorrang zu gewähren. Wenn das Egofahrzeug in der Lage ist, diese Anforderungen zu erfüllen, erfüllt es wesentliche Anforderungen der verschiedenen aufgelisteten Szenarien. Darunter fallen Einfahrten in Fußgängerüberwege, Bahnübergänge oder fremdreservierte Kreuzungen. Genauso sind die mit longitudinalen Überquerungen in eigenreservierte Bereiche in verschiedenen Szenarien enthalten. So besitzt das Egofahrzeug bei einer aktiven LSA und einem grünen Signal Vorrang. In einen zugangsbeschränkten Bereich darf das Egofahrzeug ebenfalls nur bei Erfüllen einer Bedingung einfahren, besitzt dann aber ein Vorfahrtsrecht gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern.

Das Wissen über die Verhaltensanforderungen in einzelnen Szenarien ermöglicht es, diese zusammenzufassen. Im Vergleich zu Referenzansätzen, die darauf abzielen, die gesamte Szenerie darzustellen, ist eine Verringerung der notwendigen Testumgebungen für die Verhaltens- und Trajektorienplanung möglich. Dementsprechend ist ein Ansatz zur Szenariogenerierung auf Basis von BSSD spezifisch im Kontext des Projekts UNICARagil bezogen auf die Validierung dieses Moduls vielversprechend. Allerdings stellt dies eine reine Abschätzung dar, sodass eine Evaluation über den Bestand der zweiten Hypothese erst nach der tatsächlichen Methodikentwicklung umsetzbar ist.

BSSD Attribute:

Wechsel von *Own-Reserved* zu
Externally-Reserved

Crossing Type: *Conditional*



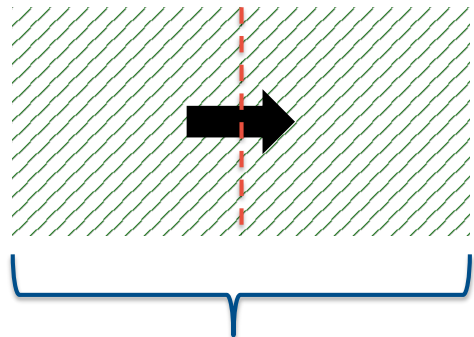
Dazugehörige Szenarien:

- Einfacher Fußgängerüberweg
- Einfahrt in eine Kreuzung ohne Vorrang
- Einfahrt auf einen Bahnübergang
- Einfahrt auf einen querführenden Fahrradweg

BSSD Attribute:

Wechsel von *Own-Reserved* zu
Own-Reserved

Crossing Type: *Conditional*



Dazugehörige Szenarien:

- Einfahrt in eine Kreuzung mit Vorrang
- Überqueren einer Kreuzung mit Lichtsignalanlage
- Einfahrt in einen zugangsbeschränkten Bereich

Abbildung 4-15: Anforderungsmengen für ausgewählte Übergänge

4.4 Entwicklung einer BSSD Szenerie

Das Ziel des Gesamtkapitels besteht darin, eine Methodik zur Generierung funktionaler Szenerien aufzubauen. Diese Methodik wird dazu in zwei Schritte unterteilt. In einem ersten Schritt wird in diesem Unterkapitel definiert, wie solch eine Szenerie aussieht. Im Anschluss daran wird eine Methodik zum Hinzufügen von dynamischen Elementen und ihren Zuständen vorgestellt sowie ein Rahmen für die Entwicklung von Aktionen und Events aufgebaut.

4.4.1 Aufbau einer BSSD Szenerie

Wie in Kapitel 2.1.1 dargestellt umfasst die Szenerie alle (quasi-)statischen Elemente im Straßenverkehr. Um den Entwurf einer Szenerie so zu formalisieren, dass sämtliche relevanten Elemente identifiziert werden, wird in einem ersten Schritt ein Referenzmodell betrachtet, das bereits für das Erzeugen von Szenerien genutzt wird. Die einzelnen dort genannten Bestandteile werden auf ihren Abstraktionsgrad und ihre Bedeutung für die Verhaltensplanung sowie ihre Repräsentierbarkeit durch das BSSD Konzept überprüft, bevor im Anschluss daran die eigentliche Formalisierung erklärt wird. In diesem Schritt wird explizit nur die Relevanz für die Verhaltensplanung berücksichtigt, da eine Einbeziehung von weniger abstrakten Elementen anschließend bei der Generierung von logischen und konkreten Szenarien erfolgt. Durch die Erstellung funktionaler Szenarien in einem ersten Schritt wird die Möglichkeit geschaffen, dass möglichst viele verschiedene Szenerien auf der abstrakten Ebene der Verhaltensanforderungen zusammengefasst werden, um den entstehenden Parameterraum zu begrenzen.

Betrachtung des 6-Ebenenmodells

Eine Betrachtung der Szenerie ohne ein Referenzmodell, wie z.B. das 6-Ebenenmodell, würde darin resultieren, dass eine aufwendige Sammlung aller möglichen Elemente einer Szenerie notwendig wäre, ohne zu wissen, inwiefern diese Sammlung vollständig ist. Da der Fokus dieser Arbeit auf der Erstellung einer Methodik für die Szenario- und Testfallgenerierung liegt, wird daher das Referenzmodell von Bock et al. genutzt⁸⁴. Die vierte Ebene der bewegbaren Objekte wird jedoch vernachlässigt, da diese nicht Teil der Szenerie sind.

Die erste Ebene des Modells stellt die Fahrbahngeometrie, deren laterale Grenzen sowie deren Beschaffenheit dar. Dadurch entsteht bereits auf dieser Ebene ein bedeutender Parameterraum, da die geometrische Darstellung sehr stark variieren kann und eine signifikante Anzahl an Variablen besitzt. Die Geometrie der Fahrbahn besitzt in einem ersten Schritt keine Bedeutung für die Verhaltensplanung, da ein Verbleiben innerhalb der lateralen Grenzen eine Anforderung darstellt, die unabhängig von der Fahrbahnbreite oder der Fahrbahnkrümmung besteht. Eine explizite Darstellung der Fahrbahn in ihren verschiedenen Parametern ist in BSSD damit auch nicht vorgesehen, da sich das Konzept auf die Extraktion verhaltensrelevanter Merkmale konzentriert. Die Anpassung der

⁸⁴ Bock, J. et al.: Data basis for scenario-based validation of HAD on highways (2018).

Geschwindigkeit innerhalb solch einer Fahrbahn ist beispielsweise eine Aufgabe der Trajektorienplanung und wird daher erst bei der Erstellung von logischen und konkreten Szenarien berücksichtigt.

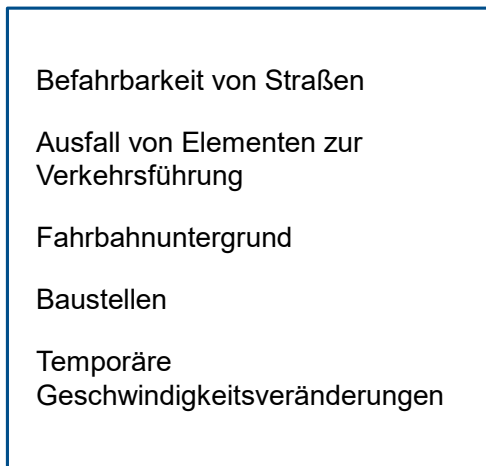
Bock et al. definieren auf der zweiten Ebene die Verkehrsinfrastruktur. Dazu gehören Verkehrszeichen (VZ), die Verkehrsführung sowie Fahrbahnmarkierungen. Die verschiedenen Kategorien von Verkehrsschildern und ihre Bedeutung für Verhaltensanforderungen wurden bereits bei der Definition von Anforderungen an die Verhaltens- und Trajektorienplanung geklärt, sodass hier nicht nochmals näher auf einzelne Verkehrsschilder eingegangen wird. Es ist jedoch zu betonen, dass eine Unterscheidung zwischen Verkehrsschildern mit und ohne Auswirkungen auf die Verhaltensanforderungen notwendig ist. Verkehrsschilder, die lediglich eine Art Beschreibung des geometrischen Aufbaus der Szenerie vornehmen besitzen keine Relevanz für den Aufbau eines funktionalen Szenarios. Dagegen weisen Verkehrsschilder, die Verhaltensregeln festlegen, eine signifikante Bedeutung für die Verhaltensplanung auf. Somit ist es notwendig, diese bei der Gestaltung von funktionalen Szenarien zu berücksichtigen. Bei der Analyse von Anforderungen an das zu überprüfende Modul in Kapitel 4.2 wurden drei Kategorien von Verkehrsschildern kreiert. Dies sind Schilder zur Regelung des Verkehrsflusses, zur Regelung des Vorrangs und zur Bestimmung von Zufahrtsbeschränkungen. Diese drei Kategorien sind alle durch verschiedene Attribute innerhalb des BSSD Konzepts repräsentierbar und werden daher bei der Kreierung von Szenerien auf Verhaltensebene integriert. Des Weiteren gehören LSA zur Verkehrsführung, welche die Verhaltensanforderungen an das Egofahrzeug beeinflussen. Daher werden diese auch im BSSD Konzept durch entsprechende longitudinale Grenzen berücksichtigt. Genauso besitzen Fahrbahnmarkierungen in den meisten Fällen eine Bedeutung für Verhaltensregeln. Bei Fahrbahnmarkierungen wird zwischen Markierungen in Form von Linien, die quer zum Fahrstreifen oder längs am Rande des Fahrstreifens bestehen, und Markierungen, die Verkehrsregeln oder geometrische Verläufe repräsentieren, unterschieden. Für die Verhaltensplanung sind insbesondere die Linienverläufe relevant, da sie die geometrischen Grenzen von Verhaltensräumen repräsentieren. Andere Arten von Fahrbahnmarkierungen werden teilweise auch durch Verkehrsschilder repräsentiert. Pfeilmarkierungen zur Bestimmung der Richtung von gewissen Fahrstreifen bedürfen auch keiner unmittelbaren Darstellung in BSSD, da diese durch die Gestaltung des Kartenmaterials bereits berücksichtigt werden.

Die dritte Ebene beschreibt nach Bock et al. temporäre Veränderungen im Straßenverkehr. Um die Relevanz solcher temporären Veränderungen zu analysieren, wurden verschiedene Ausprägungen solcher Veränderungen gesammelt und die dazu korrespondierenden Auswirkungen auf die Szenerie betrachtet. Diese sind in Abbildung 4-16 dargestellt. Die bei den Veränderungen der Szenerie markierten Elemente besitzen dabei eine Relevanz für die Verhaltensplanung.

So ist es möglich, dass durch Straßenschäden die Befahrbarkeit eines Fahrstreifens oder eines Fahrstreifenteils beeinträchtigt wird. Eine Veränderung des Fahrbahnumtergrunds durch eine Verschlechterung des Fahrbahnbelags führt jedoch nicht zwingend zu einer Veränderung der Befahrbarkeit. Es ist möglich, dass aus Sicht der Trajektorienplanung eine Geschwindigkeitsanpassung notwendig ist. Der Ausfall von Elementen zur Verkehrsführung umfasst den möglichen Ausfall von LSA oder den Ausfall von Wechselzeichen. Baustellen besitzen signifikante Auswirkungen auf die Szenerie. Zur Umsetzung von Baustellen werden oft Fahrstreifenabschnitte gesperrt oder Fahrstreifen verengt. Eine

weitere durch Baustellen bedingte Erscheinung sind verringerte Geschwindigkeitsbegrenzungen oder die temporäre Einführung von LSA aufgrund von Fahrbahnverengungen. Zudem ist es möglich, dass in Baustellenbereichen Überholverbote herrschen. Diese temporären Veränderungen besitzen teilweise auch Konsequenzen für die Verhaltensplanung und werden entsprechend in BSSD berücksichtigt.

Temporäre Veränderungen im Straßenverkehr



Auswirkungen auf Verhaltensanforderungen in der Szenerie

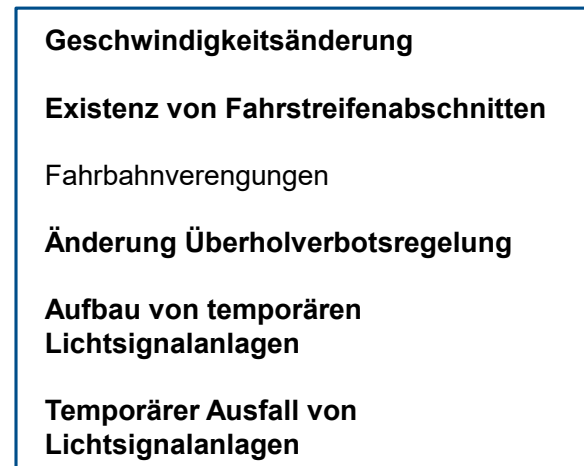


Abbildung 4-16: Temporäre Veränderungen im Straßenverkehr

Die fünfte Ebene des 6-Ebenen Modells umfasst die Umweltbedingungen, die in einer Szenerie vorliegen. Hierzu gehören das Wetter, Temperaturen sowie die Tageszeit und ihre Auswirkungen auf andere Ebenen des Modells. Diese Kategorien besitzen unterschiedliche Zustände.

So sind mögliche Ausprägungen des Wetters Sonne, Nebel, Regen und Schnee. Diese Faktoren haben je nach Intensität einen Einfluss auf die Sichtweite und die Auflösung, was insbesondere für die Objekterkennung ein Problem darstellt. Zudem beeinflussen Regen und Schnee die Fahrbahn durch einen veränderten Reibwert. Genauso beeinflussen Kälte und Hitze in Kombination mit anderen Faktoren den erreichbaren Reibwert. Aus Sicht der Verhaltensplanung ist es jedoch nicht notwendig, Variationen des Reibwerts und der Auflösung zu berücksichtigen. Hier ist eine klare Abgrenzung der Aufgaben wichtig. So ist eine Veränderung des Reibwerts für die fahrdynamische Aufgabe und teilweise für die Trajektorienplanung relevant, um größere Sicherheitsabstände bei verschlechtertem Reibwert zu berücksichtigen. Was jedoch aus Sicht der Verhaltensplanung eine signifikante Relevanz besitzt, ist eine Veränderung in der Sichtweite. Die Tageszeitzustände nehmen verschiedene Formen an, die sich grundsätzlich in Tag und Nacht unterteilen lassen. Dazwischen gibt es noch Zwischenzustände, die durch die Dämmerung, den Sonnenaufgang und -untergang dargestellt werden. Diese beeinflussen ebenfalls die Sichtweite und die Auflösung.

Ein Faktor, der im Modell von Bock bei der Repräsentation der Umwelt nicht genannt wird, sind mögliche Bebauungen oder eine Vegetation. Schuldt et al. berücksichtigen diese dagegen in ihrem 4-

Ebenen Modell⁸⁵. Gerade in einem urbanen Kontext besitzen beide Elemente aufgrund der mit ihnen einhergehenden Beeinflussung des Sichtwinkels einen Einfluss auf die Verhaltensplanung. So ist es möglich, dass beispielsweise aufgrund der nahen Bebauung an einer Kreuzung die Einsicht in eine Straße erst spät möglich ist.

Grundsätzlicher Aufbau des Modells

Der Aufbau einer Szenerie für ein funktionales Szenario auf Basis von BSSD erfolgt in drei Schritten. Diese einzelnen Schritte sind in Abbildung 4-17 dargestellt und werden in den nachfolgenden Abschnitten im Detail erläutert. Dabei werden die Erkenntnisse aus der Analyse des 6-Ebenenmodells berücksichtigt, um sicherzustellen, dass die aufgebaute BSSD Szenerie in der Lage ist, sämtliche Verhaltensanforderungen einer realen Szenerie darzustellen.



Abbildung 4-17: Methodik zur Generierung einer funktionalen Szenerie

Aufbau eines Streckennetzes

Der erste Schritt beruht auf der Grundstruktur von BSSD, die in Kapitel 2.4.1 bereits erläutert wurde. Allerdings ist es dazu nicht notwendig, alle Klassen der BSSD Road Network Representation zu nutzen. Grundsätzlich lassen sich die Szenerien durch Segmente und eine ausgewählte Anzahl an Verhaltensräumen innerhalb dieser Segmente darstellen. Während dieses Schritts werden auch die Nachbarn der einzelnen Verhaltensräume sowie die Vorgänger und Nachfolger einzelner Verhaltensräume bestimmt. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, dass auch bei Segmenten, in denen alle VHR eine Eigenreservierung besitzen, eine das Segment kreuzende Abfolge an Verhaltensräumen aufgebaut wird. Dieser Sonderfall dient zur Darstellung von eigenreservierten Bereichen, die trotzdem Teil einer Kreuzung sind. Nur so wird sichergestellt, dass nicht nur überprüft wird, ob das Egofahrzeug in der Lage ist, anderen Verkehrsteilnehmern Vorrang zu gewähren, sondern ob es in der Lage ist, das eigene Vorfahrtsrecht wahrzunehmen. Durch dieses Vorgehen entsteht ein Netzwerk an

⁸⁵ Schuldt, F.: Diss., Methodisches Testen von automatisierten Fahrfunktionen mit Hilfe von virtuellen Umgebungen (2017).

Verhaltensräumen, in dem sich das Egofahrzeug bewegen kann. Des Weiteren wird der Begriff Verhaltensraumsequenz eingeführt:

Eine Verhaltensraumsequenz bezeichnet die Abfolge vom ersten Verhaltensraum bis zum letzten Verhaltensraum in longitudinaler Richtung.

Ein signifikanter Vorteil der durch den Aufbau von BSSD Szenerien entsteht, ist die Möglichkeit, einzelne Verhaltensräume beziehungsweise Verhaltensraumsequenzen zu überprüfen, ohne dass eine umfangreiche weitere Umgebung zwingend notwendig ist. Es wäre nicht effizient und auch nicht effektiv durch BSSD größere Umgebungen für ein funktionales Szenario zu beschreiben. Dadurch würden die Vorteile von BSSD mitigiert werden. Einer der entscheidenden Vorteile von BSSD besteht darin, dass sich die Anforderungen an das Egofahrzeug aus Attributen in den einzelnen Verhaltensräumen ergeben. Diese beschriebene Vorgehensweise zum Aufbau von Szenerien, die nur aus einem stark limitierten Umfeld bestehen, stellt einen der wesentlichen Vorteile der Methodik dar. Durch die Nutzung von BSSD zur Generierung von Szenerien ist es direkt möglich, zu erkennen, welche Anforderungen innerhalb einer Szenerie überprüfbar sind. Dadurch wird verhindert, dass redundante Szenerien entwickelt werden, beziehungsweise Szenerien entwickelt werden, ohne ein Bewusstsein dafür zu besitzen, welcher Prüffortschritt sich darauf basierend ergibt.

Es ist notwendig, die Referenzrichtung von Verhaltensräumen festzulegen. Bei der Bestimmung dieser Referenzrichtung werden Regeln eingeführt, um die Konformität mit realen Szenerien sicherzustellen.

- 1.) *Es ist grundsätzlich eine Entscheidung zu treffen, ob eine Szenerie mit oder ohne Gegenverkehr kreiert wird.*
- 2.) *In longitudinaler Richtung findet maximal einmal eine Richtungsänderung der Referenzrichtung innerhalb einer Verhaltensraumsequenz statt.*
- 3.) *Innerhalb eines Segments darf es nur einen Wechsel der Referenzrichtung geben.*

Die erste Regel dient dazu, den gesamten Prozess der Referenzrichtungsbestimmung zu beschleunigen, während die zweite und dritte Regel Rahmenbedingungen für die Richtungsbestimmung darstellen. Dem Autor dieser Arbeit sind keine Szenerien bekannt, die mehr als einen Richtungswechsel in longitudinaler Richtung besitzen, die nicht separat in zwei Szenerien darstellbar sind. Die dritte Regel hingegen zielt darauf ab, dass ein Verhaltensraum in entgegengesetzter Richtung der beiden benachbarten Verhaltensräume in lateraler Richtung sich in der Realität nicht auffinden lässt und damit eine Abdeckung nicht notwendig ist.

Befüllung der VHR mit BSSD Attributen

Während des zweiten Schritts werden die einzelnen Verhaltensräume mit Attributen gefüllt. Dafür wird erst festgelegt, welche Attribute und Spezifikationen dieser Attribute existieren. Anschließend werden Einschränkungen in den Attributkombinationen innerhalb einzelner VHR beschrieben sowie Einschränkungen bei Verhaltensraumkombinationen. Der Aufbau von *Non-Regular Motion Spaces* und *Regular Motion Spaces* aufgrund von Fremdreservierungen wird in einem letzten Schritt ausdetailliert.

Die Befüllung der Attribute wird in Anlehnung an das von Lippert et al. in Anhang B dargestellte Klassendiagramm im Format der Unified Modeling Language (UML) umgesetzt. Abgeleitet daraus lassen sich die Attribute wie in Abbildung 4-18 dargestellt unterteilen.

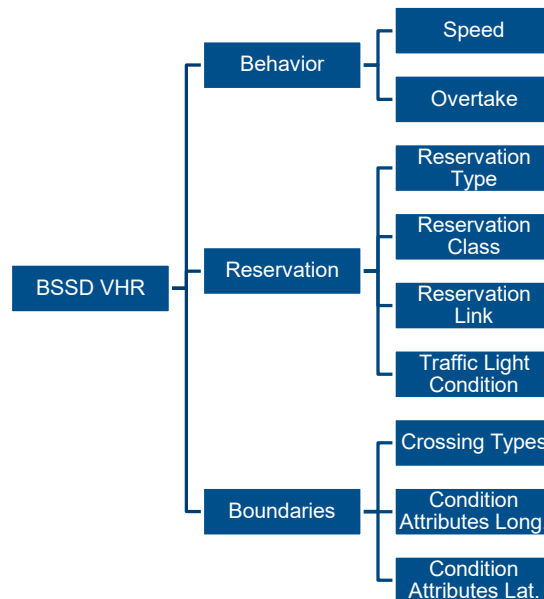


Abbildung 4-18: BSSD Attribute für die Generierung einer funktionalen Szenerie

Vor der Befüllung der VHR wird die Richtung, in der sich das Egofahrzeug innerhalb einer Szenerie bewegen wird, bestimmt. Dieser Schritt wird durchgeführt, da Attribute von VHR nur für die Richtung, in die sich das Egofahrzeug bewegt, bestimmt werden. Für die entgegengesetzte Richtung werden keine Verhaltensanforderungen aufgestellt, da diese keine unmittelbare Relevanz für das Egofahrzeug besitzen. Für den Fall, dass die Referenzrichtung eines VHR nicht mit der Richtung des Egofahrzeugs übereinstimmt, wird eine Fremdreseverierung des VHR festgehalten. Eine Ausnahme besteht für den Fall, dass ein VHR der einzige seines Segments ist. In diesem speziellen Fall ist es auch möglich, dass eine gleichberechtigte Reservierung besteht.

Jeder VHR bekommt eine Geschwindigkeitsbegrenzung zugewiesen. Zudem wird für jeden VHR festgelegt, ob dort ein Überholverbot besteht. Ein weiteres Attribut, das festgelegt wird, ist die Art von Reservierung, die in einem VHR besteht. Des Weiteren werden die longitudinalen Grenzen am Eintritt sowie die lateralen Grenzen bestimmt sowie eventuelle Eintrittsbedingungen spezifiziert. Die longitudinale Begrenzung des VHR ergibt sich durch die Eintrittsgrenze des nachfolgenden VHR.

Nach Abbildung 4-18 werden die verschiedenen Bedingungen, die für einen Verhaltensraumwechsel existieren als *Condition Attributes* zusammengefasst. Darunter fallen in longitudinaler Richtung Bedingungen für eine LSA, das Halten zur Berücksichtigung eines Stoppschildes sowie Zufahrtsbeschränkungen. Eine weitere Bedingung ist vorhanden, um sicherzustellen, dass ein Verhaltensraum nicht für andere Verkehrsteilnehmer aufgrund von stockendem Verkehr blockiert wird (*no_stagnant_traffic*). In lateraler Richtung beinhalten solche Regeln auch das Attribut *no_stagnant_traffic* sowie eine Einfahrt unter der Bedingung, dass das Egofahrzeug beabsichtigt, einzuparken. Des Weiteren werden hierdurch gewisse fahstreifenspezifische Zufahrtsbeschränkungen berücksichtigt.

Bei dem Befüllen der VHR mit Attributen sind einige Einschränkungen in der Kombinatorik innerhalb eines VHR zu berücksichtigen. Daneben existieren Einschränkungen für die Befüllung von VHR aufgrund ihrer Abhängigkeit von Nachbarn in lateraler Richtung oder aufgrund von vorhergehenden und nachfolgenden VHR. Die geltenden Regeln und Einschränkungen werden nachfolgend erläutert.

Eine der grundlegenden Regeln innerhalb eines VHR legt fest, dass, falls eine Grenze mit dem *Crossing Type Conditional* belegt wurde, ein *Conditional Attribut* auszuwählen ist, da die Spezifikation ansonsten unvollständig ist. Des Weiteren impliziert eine Eigenreservierung, dass ein Verkehrsraum für motorisierte Fahrzeuge reserviert ist. Mit der Bedingung, dass das Einfahren in einen Verhaltensraum nur bei einem entsprechenden Signal der LSA erlaubt ist, geht einher, dass es sich um eine Szenerie handelt, in der sich andere Verkehrsteilnehmer befinden. Diese Bereiche sind freizuhalten, weshalb bei einer LSA zusätzlich das *Conditional Attribute no_stagnant_traffic* vorhanden ist. Des Weiteren folgt für den Verhaltensraum in den dann eingefahren wird, dass das Egofahrzeug dort eine Eigenreservierung besitzt. Da nur die Verhaltens- und Trajektorienplanung überprüft wird, ist es auch nicht notwendig, neben den Attributen für eine funktionierende LSA weitere Attribute für eine nicht funktionierende LSA hinzuzufügen. Die Verhaltensanforderungen in solch einer Situation unterscheiden sich nicht von denen, die bei gleicher Vorrangregelung ohne LSA existieren. Die Detektion und das Verständnis, dass eine LSA nicht funktioniert und daher andere Regeln innerhalb einer Kreuzung gelten, zählt nicht zu den Aufgaben der Verhaltens- und Trajektorienplanung.

Ein weiteres Attribut, das gewisse andere Verhaltensanforderungen bereits impliziert, besteht in einer Geschwindigkeitsbegrenzung in Höhe der Schrittgeschwindigkeit. Nur in verkehrsberuhigten Bereichen ist solch eine Geschwindigkeit vorgegeben. Gleichzeitig dürfen sich Fahrradfahrer und Fußgänger in diesem Bereich aufhalten beziehungsweise besitzen sogar Vorrang. Daher besitzen VHR, die solch eine Szenerie repräsentieren neben der Schrittgeschwindigkeit eine Fremdreservierung für Fußgänger und Fahrradfahrer.

Des Weiteren beschreibt ein Stoppschild eine Szenerie, in der ein Verkehrsteilnehmer an einer Haltelinie stoppen muss, um Verkehrsteilnehmern, die aus einer anderen Richtung kommen, Vorfahrt zu gewähren. Daher impliziert ein Stoppschild, dass der Verhaltensraum in den eingefahren wird, eine Fremdreservierung besitzt. Somit besitzt ein Verhaltensraum mit dem *Condition Attribute stop* den *Reservation Type Externally-Reserved*.

Gleichzeitig existieren verschiedene Kombinationen von Attributen in einem VHR, die sich ausschließen. Diese Einschränkungen resultieren daraus, dass dem Autor dieser Arbeit nach Recherchen zum Straßenverkehr in Deutschland keine der dargestellten Kombinationen bekannt sind. Ein Beispiel für solch eine Szenerie ist die Kombination einer LSA mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung von weniger als $30 \frac{km}{h}$. Damit schließen sich die dazugehörigen Attribute aus. Abgeleitet aus Anhang A sind gewisse Kombinationen von longitudinalen Grenzen und Reservierungen nicht vorhanden. Dazu gehören die Kombinationen *Equally-Reserved – prohibited*, *Equally-Reserved – Not possible* und *Own-Reserved – Prohibited*. Vorrangsregelungen, die in den Bedingungen zum Überqueren von longitudinalen Grenzen integriert sind, schließen sich gegenseitig aus. So wird ein Stoppschild nicht mit einer LSA kombiniert, um gleichzeitige Verhaltensanforderungen zu repräsentieren. Zudem ist

es nicht unbedingt notwendig, die Verhaltensraumgrenze *Not possible* in longitudinaler Grenze mehrfach zu testen, da die dadurch entstehenden Situationen in den gleichen Anforderungen an das Ego-fahrzeug, unabhängig von den jeweiligen Reservierungsrechten, resultieren. Zudem wird eine longitudinale Grenze mit dem *Crossing Type Not possible* nicht oft in realen Szenarien vorgefunden.

Weitere Einschränkungen ergeben sich dadurch, dass gewisse Verhaltensraumsequenzen in der Realität nicht vorhanden oder dem Autor nicht bekannt sind. Diese Kombinationen sind in der untenstehenden Tabelle 4-1 dargestellt. In Anhang A ist eine detaillierte Auflistung von realen Szenarien dargestellt, auf dessen Basis sich die Kombinatorikeinschränkungen aus Tabelle 4-1 ergeben.

Tabelle 4-1: Longitudinale Verhaltensraumsequenzen ohne entsprechende reale Szenarien

Ausgeschlossene Verhaltensraumsequenzen in longitudinaler Richtung		
VHR 1 – Reservierung	VHR 2 – Reservierung	Crossing Type
Unabhängig	<i>Own-Reserved</i>	<i>Prohibited</i>
Unabhängig	<i>Equally-Reserved</i>	<i>Prohibited</i> <i>Not possible</i>
<i>Externally-Reserved</i> <i>Equally-Reserved</i>	<i>Own-Reserved</i>	<i>Not possible</i>
<i>Externally-Reserved</i>	<i>Externally-Reserved</i>	<i>Not possible</i>
<i>Own-Reserved</i> <i>Equally-Reserved</i>	<i>Equally-Reserved</i>	<i>Conditional</i>
<i>Equally-Reserved</i>	<i>Externally-Reserved</i>	<i>Prohibited</i>
<i>Equally-Reserved</i>	<i>Externally-Reserved</i>	<i>Not possible</i>

Für lateral angrenzende VHR existieren ebenfalls Einschränkungen. Diese sind in Tabelle 4-2 dargestellt. Für den Fall, dass ein VHR eigenreserviert ist und ein lateral angrenzender VHR eine gleichberechtigte Reservierung besitzt, existieren nur Szenarien, falls die Gleichberechtigung dadurch entsteht, dass in dieselbe Referenzrichtung mehrere Verkehrsteilnehmer ein Reservierungsrecht besitzen. Die gleichberechtigte Reservierung, die dadurch entsteht, dass Verkehrsteilnehmer in entgegengesetzte Richtungen denselben Vorrang innehaben, besitzt keine lateral angrenzenden VHR mit Eigenreservierung. Diese Art von Szenerie existiert allerdings in anderen Ländern, in denen oftmals ein Fahrstreifen für beide Fahrtrichtungen existiert, der nur für Abbiegemanöver zu nutzen ist.

Tabelle 4-2: Laterale Verhaltensraumsequenzen ohne entsprechende reale Szenarien

Ausgeschlossene Verhaltensraumsequenzen in lateraler Richtung		
VHR 1 – Reservierung	VHR 2 – Reservierung	Crossing Type
<i>Equally-Reserved</i>	<i>Equally-Reserved</i>	<i>Allowed Conditional Prohibited Not possible</i>
<i>Own-Reserved</i>	<i>Externally-Reserved</i>	<i>Conditional</i>
<i>Own-Reserved</i>	<i>Equally-Reserved</i>	<i>Prohibited</i>
<i>Own-Reserved</i>	<i>Equally-Reserved</i>	<i>Not possible</i>
<i>Externally-Reserved</i>	<i>Externally-Reserved</i>	<i>Conditional</i>
<i>Externally-Reserved</i>	<i>Equally-Reserved</i>	<i>Conditional</i>
<i>Equally-Reserved</i>	<i>Own-Reserved</i>	<i>Prohibited</i>
<i>Equally-Reserved</i>	<i>Own-Reserved</i>	<i>Not possible</i>

Für den Fall, dass VHR als fremdreserviert definiert werden, ist es notwendig, die Art der Verkehrsteilnehmer und die Richtung, aus der sie stammen, zu spezifizieren. Die Richtung wird über Reservation Links angegeben. Diese Elemente referenzieren auf *Lane* Elemente oder auf *Non-Regular Motion Spaces*. Zu dem Zeitpunkt der Erstellung der Reservierung existieren diese jedoch noch nicht. Daher ist es notwendig, diese Elemente im Rahmen der Reservierung zu erstellen. Hierbei ist es möglich, zwischen Reservierungen zu unterscheiden bei denen Verkehrsteilnehmer mit Reservierung aus einem Bereich längs zur Fahrtrichtung in den Bereich einfahren oder ob sie quer zu dem VHR einfahren. Eine Einfahrt längs zur Fahrtrichtung wäre beispielsweise vorhanden, falls sich das Egofahrzeug auf einem Fahrstreifen für die Gegenrichtung befindet. Diese Art von Reservierungssituation ist in Abbildung 4-19 dargestellt. Verkehrsteilnehmer, die dort ein Reservierungsrecht besitzen, fahren längs zur Fahrtrichtung in den Verhaltensraum ein.

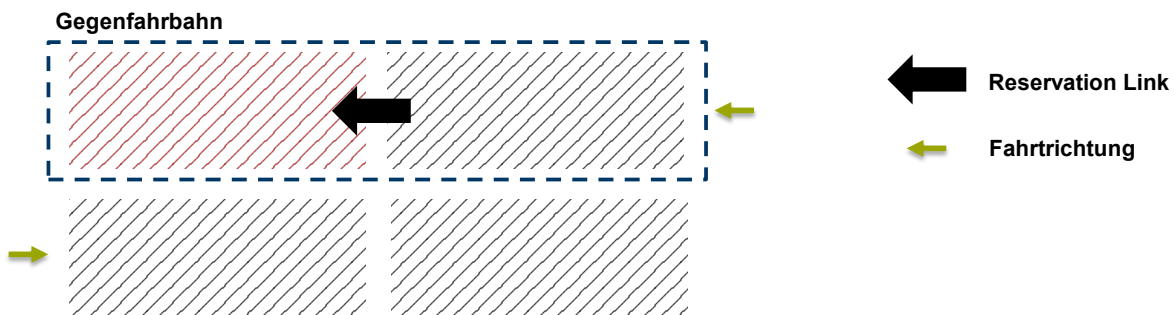


Abbildung 4-19: Reservation Link mit Längseinfahrt von Verkehrsteilnehmern

Die Höhe, auf der sich ein *Reservation Link* befindet, wird im Rahmen der Parametrisierung bestimmt. Der *Reservation Link* verweist dabei immer auf ein *Lane* Element, wenn die Reservierung für ein motorisiertes Fahrzeug gilt. Bei schienengebundenen Fahrzeugen und Fahrradfahrern ist es

möglich, dass die Verkehrsteilnehmer von einem anderen Fahrstreifen aus stammen oder aus einem Bereich, der ausschließlich für ihre eigene Nutzung vorgesehen ist. Fußgänger dagegen treten immer quer zum Fahrstreifen in einen Bereich ein und stammen aus einem *Non-Regular Motion Space*. Bei Fußgängern wird außerdem berücksichtigt, dass bei einem Überqueren mehrerer Fahrstreifen auch zusätzlich angrenzende Fahrstreifen als *Reservation Links* hinzugefügt werden, da so alle potenziellen Bereiche, aus denen ein Fußgänger stammen kann, markiert werden.

Die Bereiche, aus denen die Verkehrsteilnehmer mit Reservierungsrecht stammen, werden als Quellen bezeichnet. Nachdem diese Quellen erzeugt sind, ist es notwendig, das Zielelement dieser Verkehrsteilnehmer zu definieren. Dabei orientiert sich die Art von Element, die hier erzeugt wird, an den gleichen Voraussetzungen, die beim Eingangselement herrschen. *Reservation Links* können sowohl auf das Eingangs- als auch das Ausgangselement referenzieren.

Variation von Systemeingängen

Der dritte Schritt dient dazu, einen speziellen Aspekt der Verhaltensplanung zu überprüfen. Dabei handelt es sich um das Verhalten des Egofahrzeugs bei mangelndem Wissen über die Szenerie. Die erste Idee, hierzu die Systemeingänge, die in die Verhaltens- und Trajektorienplanung eingehen, zu beschränken, stammt aus einem Gespräch mit Moritz Lippert und Björn Klamann. Solche Situationen mit mangelndem Wissen über die Szenerie entstehen aufgrund von Umweltbedingungen, die die Fähigkeiten des Egofahrzeugs limitieren. Diese Unsicherheit über die Umgebung wird durch eine Variation verschiedener Systemeingänge dargestellt. Hierzu gehört eine Einschränkung der Sichtweite und des Sichtwinkels. Insbesondere die Einschränkung des Sichtwinkels ist in einem urbanen Umfeld von hoher Relevanz. Während sich die Sichtweite über die Angabe einer einfachen Distanz parametrisieren lässt, bedarf die Einschränkung des Sichtwinkels einer umfassenderen Definition. Dabei ist es notwendig, zu definieren in welchem Bereich eine Einschränkung des Sichtwinkels herrscht – beispielsweise eine vorfahrtsgewährende Straße, die auf eine Kreuzung führt – und für welchen Bereich diese existiert – beispielsweise eine Vorfahrtsstraße. Die genaue Parametrisierung bis zu welchem Wegpunkt die Einsicht in die Vorfahrtsstraße nicht möglich ist, erfolgt später im Prozess.

Die Verhaltensplanung basiert auf Lanelet2 und Umgebungsinformationen. Da die Planung allerdings nicht auf BSSD basiert, besitzt das Fahrzeug kein direktes Wissen darüber, welche Informationen es zum Befahren eines Bereichs benötigt. Daher sind solche Testfälle mit eingeschränkten Systemeingängen relevant, um das Situationsverständnis der Verhaltensplanung zu überprüfen und gegebenenfalls Weiterentwicklungsmöglichkeiten zu beleuchten, die beispielsweise durch eine zukünftige Einbeziehung von BSSD dargestellt werden.

4.5 Aufbau eines BSSD Szenarios

BSSD Szenarien entstehen dadurch, dass dynamische Elemente sich innerhalb der entwickelten Szenerie bewegen beziehungsweise sich ihre Zustände verändern. Um die Funktionalität der Verhaltensplanung effektiv und effizient zu überprüfen, ist es notwendig, klar zu definieren, was im Rahmen von unterschiedlichen Szenerien überprüft wird, wie die Interaktion von dynamischen Elementen abgebildet wird und wie möglichst wenig redundante Szenarien entstehen.

4.5.1 Testziele in verschiedenen Szeneriesequenzen

Die Strukturierung von Szenerien dient dazu, einen Überblick darüber zu erhalten, welche Anforderungen in der jeweiligen Szenerie überprüfbar sind. Dabei werden drei Begriffe eingeführt, um wesentliche Arten von Szenerien darzustellen: Durchfahrten, Übergänge und Durchquerungen. Neben diesen drei Kategorien wird eine zusätzliche Gruppe von Szenerien eingeführt, deren Hauptziel die Überprüfung der Interaktion des Egofahrzeugs mit anderen Verkehrsteilnehmern ist. Diese zusätzliche Gruppe stellt zudem Szenerien dar, die möglicherweise komplexer sind. Komplexer bedeutet in diesem Zusammenhang, dass durch eine Vielzahl an umliegenden Verhaltensräumen ein größeres Potenzial für die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern besteht.

Durchfahrten

Durchfahrten stellen Szenerien dar, in denen nur ein einziger VHR vorhanden ist. Innerhalb dieses VHR ist es jedoch bereits möglich, eine signifikante Anzahl an Überprüfungen durchzuführen. Mit der Limitierung der Szenerie auf einen einzelnen VHR gehen jedoch Einschränkungen bezüglich der Attribute des VHR einher. So ist es nicht möglich, eine Fremdeservierung in dieser Szenerie zu überprüfen. Dazu sind mehrere VHR notwendig, da sich das Egofahrzeug in einem fremdeservierten Bereich nur temporär aufhalten darf. Dieselbe Limitierung ergibt sich für VHR mit einer geteilten Reservierung für Verkehrsteilnehmer in entgegengesetzte Richtungen. Hierfür werden auch Ausweichräume benötigt beziehungsweise es würden Situationen entstehen, die nicht lösbar sind. Als lösbar wird in diesem Kontext eine Situation dann bezeichnet, wenn am Ende eines Szenarios alle Verkehrsteilnehmer ihre Ziele erreicht haben. Daraus folgt, dass der VHR entweder eine Eigenreservierung oder eine geteilte Reservierung für Verkehrsteilnehmer, die sich in die gleiche Richtung bewegen, besitzt.

In dieser Szenerie ist es möglich, bereits zahlreiche Verhaltensanforderungen zu überprüfen. So wird durch das Befahren dieses einzelnen VHR kontrolliert, ob das Egofahrzeug in der Lage ist, laterale Grenzen einzuhalten. Weitere Verhaltensregeln, die innerhalb eines VHR überprüft werden, sind das Einhalten von Geschwindigkeitsregeln und Regeln zum Überholverbot. Ein Einhalten der Regeln zum Überholverbot benötigt das Hinzufügen von dynamischen Elementen. Dieser Prozess des Hinzufügens wird in Kapitel 4.5.2 genauer erläutert. Ein weiteres Manöver, das innerhalb eines VHR überprüfbar ist, besteht aus dem Verzögern aufgrund eines dynamischen Elements vor dem Egofahrzeug. Es lässt sich die Interaktion mit Verkehrsteilnehmern analysieren, die wie das Egofahrzeug ein Reservierungsrecht in diesem Bereich besitzen.

Übergänge

Übergänge bezeichnen Verkettungen von zwei VHR aneinander in longitudinaler oder lateraler Richtung. Hierbei bestehen die zugehörigen Szenarien aus nur einem Verhaltensraumwechsel. Das Ziel besteht nicht darin, mehrere Male zwischen Verhaltensräumen zu wechseln. Wie bei Durchfahrten bestehen hier dieselben Einschränkungen bezüglich der Reservierungsmöglichkeiten. Aufgrund der Limitierung, dass nur ein Verhaltensraumwechsel überprüft wird, ist es nicht möglich, das Verhalten beim Durchfahren eines fremdreservierten Bereichs zu simulieren. Damit ergeben sich insgesamt vier Kombinationen für die Reservierungsabfolge beider VHR, die in Tabelle 4-3 dargestellt sind.

Tabelle 4-3: Kombinationsmöglichkeiten für Übergänge

VHR 1	<i>Own-Reserved</i>	<i>Own-Reserved</i>	<i>Equally-Reserved</i>	<i>Equally-Reserved</i>
VHR 2	<i>Own-Reserved</i>	<i>Equally-Reserved</i>	<i>Own-Reserved</i>	<i>Equally-Reserved</i>

Bei den Überprüfungsmöglichkeiten wird zwischen Übergängen in longitudinaler und lateraler Richtung differenziert. In longitudinaler Richtung lässt sich das Einhalten der lateralen Grenzen in beiden Verhaltensräumen überprüfen. Des Weiteren wird das Einhalten von Geschwindigkeitsbegrenzungen bei Veränderungen überprüft. Daneben sind verschiedene *Crossing Types* darstellbar. Dabei ist es möglich, das Verhalten des Egofahrzeugs bei allen *Crossing Types* zu kontrollieren. Allerdings sind nicht alle *Conditional Attributes* im Rahmen dieser Szenerieabfolge überprüfbar. Dazu gehören die Attribute *no_stagnant_traffic*, das einen dritten Verhaltensraum benötigen würde sowie das Attribut *stop*, welches eine Fremdreservierung des darauffolgenden Verhaltensraums als Konsequenz hätte. Das Verhalten des Egofahrzeugs bei Zufahrtsbeschränkungen oder an LSA sind dagegen im Rahmen dieser Szenerie wird hier jedoch überprüft. Die *Crossing Types Prohibited* und *Not possible* sind allerdings im Rahmen solch eines longitudinalen Übergangs nicht umsetzbar, was in der Analyse von Kombinatorikeinschränkungen dargestellt wurde.

Die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern betreffend besteht auch hier die Möglichkeit die Einhaltung von Regeln zum Überholverbot zu überprüfen. Ein Grenzfall besteht dabei darin, wenn sich im ersten VHR vor dem Egofahrzeug ein langsamerer Verkehrsteilnehmer befindet und ein Überholen nur in dem ersten VHR gestattet ist. Hier wird überprüft, ob das Egofahrzeug dazu in der Lage ist, die Trajektorie für ein Überholmanöver richtig zu kalkulieren. Des Weiteren wird innerhalb dieser Übergangsszenarien überprüft, ob das Egofahrzeug dazu in der Lage ist, bei einem Übergang in den nächsten VHR andere Verkehrsteilnehmer mit gleichem Reservierungsrecht zu berücksichtigen.

Bei einem lateralen Übergang des Egofahrzeugs bestehen für die Einhaltung lateraler Grenzen sowie die Einhaltung von Geschwindigkeitsbegrenzungen die gleichen Anforderungen wie für longitudinale Übergänge, sodass diese auch mitüberprüft werden. Das Überqueren der lateralen Grenze und damit verbundenen Bedingungen ist grundsätzlich auch möglich. Allerdings sind auch hier bestimmte Attribute nicht darstellbar wie *no_stagnant_traffic*. Dieser laterale Übergang stellt einen klassischen Fahrstreifenwechsel dar. Hierbei wird überprüft, ob das Egofahrzeug allgemein dazu in der Lage ist, einen Fahrstreifen zu wechseln. So ist es möglich, dass sich Verkehrsteilnehmer so bewegen, dass sie

einen Fahrstreifenwechsel des Egofahrzeugs auslösen. Gleichzeitig besteht in BSSD die Anforderung, dass bei einem Wechsel des Verhaltensraums andere Verkehrsteilnehmer in ihrer Trajektorie nicht behindert werden dürfen. Daher werden Verkehrsteilnehmer so positioniert, dass diese Anforderung überprüft wird. Zusätzlich wird überprüft, wie sich das Fahrzeug verhält, wenn sich im Zielverhaltensraum ein Hindernis befindet.

Durchquerungen

Grundsätzlich besteht ein Anspruch bei der Erstellung von Szenarien beziehungsweise den zugrundeliegenden Szenarien, dass die meisten Verhaltensweisen des Fahrzeugs in einem atomaren Verhaltensraum oder durch einen Übergang zwischen verschiedenen Verhaltensräumen überprüft werden können. Diesem Anspruch liegt die Annahme zugrunde, dass die Verhaltensanforderungen einzeln überprüfbar und auf andere Situationen und Szenarien übertragbar sind. Allerdings existieren Einschränkungen zu dieser generellen Vorgehensweise. So ist es notwendig, bei manchen Verhaltensweisen des Egofahrzeugs größere Umgebungen darzustellen, um das Verhalten zu validieren. Dies ist beispielsweise bei dem temporären Aufenthalt in gewissen Bereichen der Fall. Hierzu ist es notwendig, mögliche Ausweichräume für das Egofahrzeug zu schaffen.

Durchquerungen dienen dazu, temporäre Aufenthalte in einem Bereich darzustellen. Durchquerungen bestehen aus dem Aufenthalt in drei Bereichen. Dieser Aufbau resultiert in zwei verschiedenen Szenarien. Eine dieser beiden Szenarien besteht aus drei longitudinal angrenzenden VHR, während die andere Szenerie aus zwei lateral angrenzenden VHR besteht. Im Fall der zweiten Szenerie besteht die Idee darin, dass das Egofahrzeug den VHR wechselt, bevor es wieder in den ursprünglichen VHR zurückwechselt. Im Folgenden wird die erste Szenerie longitudinale Durchquerung und die zweite Szenerie laterale Durchquerung genannt.

Die longitudinale Durchquerung besteht aus drei VHR, wobei der erste und der letzte VHR eigenreserviert sind. Der mittlere VHR besitzt eine beliebige Reservierung. Zusätzlich zu dieser Struktur wird bei einer Fremd- oder Eigenreservierung des mittleren VHR dieser von weiteren Verkehrsteilnehmern genutzt, die sich quer zu diesem Raum bewegen. Um diese Bewegungen zu ermöglichen, werden entsprechende Räume hinzugefügt. Durch diese Struktur und diese Szenerie ist es möglich, Vorrangsituationen zu erzeugen und zu überprüfen. Beide Arten von Szenarien werden in Abbildung 4-20 dargestellt.

Durch diese Szenerie werden die bekannten Verhaltensanforderungen bei Durchfahrten und Übergängen überprüft. Des Weiteren wird überprüft, inwiefern das Egofahrzeug dazu in der Lage ist, das Reservierungsrecht anderer Verkehrsteilnehmer zu berücksichtigen. Dabei wird im oberen Teil von Abbildung 4-20 dargestellt, dass beliebig viele Verkehrsteilnehmer ein Reservierungsrecht im mittleren VHR besitzen können. Durch diese Szenerie können beispielsweise auch die Verhaltensanforderungen, die bei einem Linksabbiegen entstehen, kontrolliert werden. Die Grenzen der Verhaltensräume sind bewusst nicht dargestellt, da es keine Festlegung gibt, ob diese durch den *Crossing Type Allowed* oder *Conditional* dargestellt werden. Beide sind als Parameter möglich. Zudem entsteht durch eine Eigenreservierung des mittleren VHR eine Situation, in der überprüft wird, ob das Egofahrzeug dieses Reservierungsrecht auch wahrnimmt, indem es vor anderen Verkehrsteilnehmern in

einen Bereich einfährt. Durch die longitudinale Überquerung mit einem VHR, der einer gleichberechtigten Reservierung unterliegt, wird das Kooperationsverhalten des Egofahrzeugs überprüft.

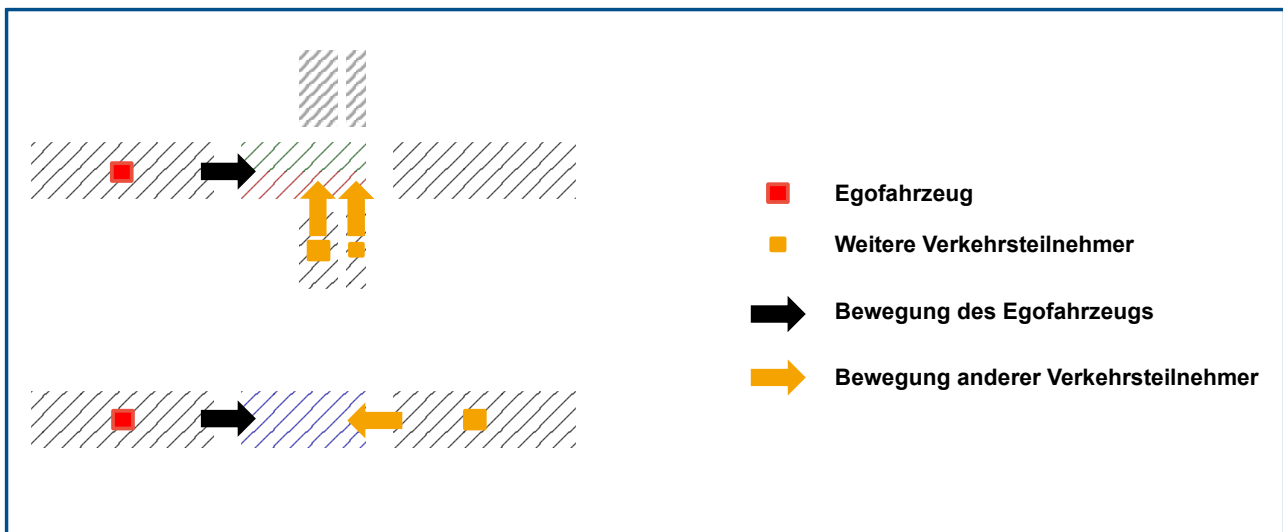


Abbildung 4-20: Variationen der longitudinalen Durchquerung

Eine laterale Überquerung besteht aus einem Segment mit zwei lateral angrenzenden VHR. Dabei ist der VHR in dem sich das Egofahrzeug zu Beginn des Szenarios befindet eigenreserviert, während der lateral angrenzende VHR eigen- oder fremdreserviert ist. Ein lateral angrenzender VHR mit gleichberechtigter Reservierung würde nur dann hier bestehen können, wenn beide Reservierung in Richtung des Egofahrzeugs zeigen. Ansonsten entsteht eine gleichberechtigte Reservierung in der Regel nur durch Fahrbahnverengungen. Die Anforderungen bei einer gleichberechtigten Reservierung in die Richtung des Egofahrzeugs sind deckungsgleich mit denen bei einer Eigenreservierung. Daher wird eine gleichberechtigte Reservierung nicht berücksichtigt, um den Parameterraum nicht ohne Mehrwert für die Validierung zu vergrößern.

In beiden Szenarien wird ein Fahrstreifenwechsel dadurch ausgelöst, dass ein Verkehrsteilnehmer oder ein Gegenstand den eigenreservierten VHR blockiert. Als blockiert wird hier auch eine langsame Durchfahrt des anderen Verkehrsteilnehmers bezeichnet.

Für den Fall, dass der angrenzende VHR eigenreserviert ist, bestehen die Anforderungen im Wesentlichen in den Anforderungen, die bei Übergängen und einer Durchfahrt in eigenreservierten Bereichen vorhanden sind. Es kommt in diesem Fall hinzu, dass es notwendig ist, dass das Passieren eines anderen dynamischen Elements durch das Egofahrzeug korrekt abgeschätzt wird.

Falls der angrenzende VHR fremdreserviert ist, besitzt der Gegenfahrstreifen eine Referenzrichtung entgegen der Fahrtrichtung des Egofahrzeugs. Ein temporärer Aufenthalt in diesem Bereich besitzt aus Sicht der Verhaltensanforderungen eine Schnittmenge mit longitudinalen Durchquerungen mit einem fremdreservierten mittleren VHR. Es besteht allerdings hier eine zusätzliche Anforderung darin, dass die Interaktion mit dem Verkehrsteilnehmer, den das Egofahrzeug überholt, korrekt abgeschätzt wird, um eine sichere Durchquerung durchzuführen.

Szenarien zur Interaktion mit dynamischen Elementen

Die bisherigen Szenarien waren auf ein sehr enges Umfeld begrenzt. Dadurch ergibt sich auch ein begrenzter Raum, aus dem andere Verkehrsteilnehmer den möglichen Bewegungsraum des Egofahrzeugs einschränken beziehungsweise beeinflussen können. Somit ist es notwendig, auf eine strukturierte Art und Weise, methodisch zu erarbeiten, welche weiteren Interaktionen durch Szenarien modelliert werden müssen. Dazu wird sich an den bisherigen modellierten Szenarien orientiert und dem möglichen Verhalten des Egofahrzeugs innerhalb dieser Szenarien. Insbesondere geht es dabei darum, Umgebungen für die Durchfahrten und Übergänge zu erzeugen.

Für Durchfahrten werden lateral angrenzende VHR erzeugt, um zu überprüfen, inwiefern die Verhaltens- und Trajektorienplanung in der Lage ist, das Ende des VHR erfolgreich zu erreichen, wenn sich weitere Verkehrsteilnehmer innerhalb der Szenerie befinden. Durch diese Erzeugung einer umliegenden Szenerie werden weitere Interaktionsmöglichkeiten geschaffen. Abbildung 4-21 stellt mögliche Bewegungen von anderen Verkehrsteilnehmern dar, die sich in den umliegenden VHR befinden. Es existieren zwei Manöver, die Verkehrsteilnehmer auf den angrenzenden VHR möglicherweise durchführen. Sie befahren entweder den VHR in Längsrichtung oder streben einen lateralen Wechsel an. Es ist auch möglich, eine Kombination dieser beiden Manöver durchzuführen. Durch eine Variation dieser verschiedenen Manöver werden sämtliche Interaktionen, die zwischen Egofahrzeug und anderen Verkehrsteilnehmern stattfinden, modelliert.

Dabei wird weiterhin der Grundsatz verfolgt, dass die Verhaltens- und Trajektorienplanung nur in Szenarien überprüft wird, in denen sich sämtliche Verkehrsteilnehmer regelkonform verhalten. Allerdings ist es auch nicht möglich, jedes Verhalten trennscharf als regelkonform einzustufen. Beispielsweise ist das Einscheren eines anderen Verkehrsteilnehmers theoretisch nach BSSD nur dann erlaubt, wenn die Trajektorie des Egofahrzeugs nicht behindert wird. Allerdings stellt dies trotzdem eine Situation dar, die aufgrund ihrer Häufigkeit im Straßenverkehr relevant für die Verhaltens- und Trajektorienplanung ist. Daher besteht auch ein Anspruch, die Verhaltens- und Trajektorienplanung in solch einem Szenario zu überprüfen.

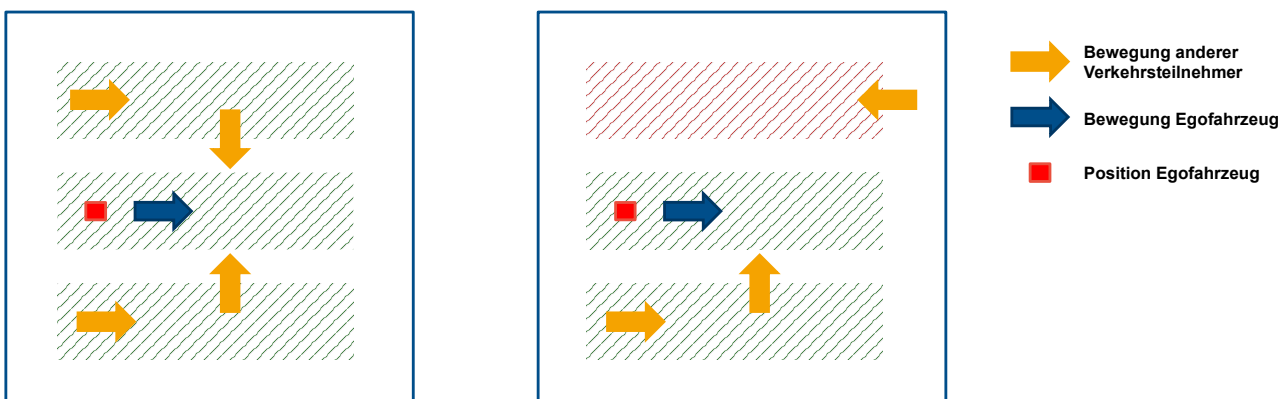


Abbildung 4-21: Durchfahrt mit angrenzenden Verhaltensräumen und Interaktionsmöglichkeiten

Bei longitudinalen Übergängen ist eine Ausweitung der Umgebung nicht notwendig. Dies liegt daran, dass sämtliche Verhaltensanforderungen, die sich durch eine Ausweitung der Umgebung ergeben würden, bereits in anderen Szenarien beziehungsweise Szenarien kontrolliert werden. Dies ist jedoch

nicht der Fall für laterale Übergänge. Hier entstehen durch eine Ausweitung der Szenerie weitere Interaktionen mit Verkehrsteilnehmern. Daraus entstehen nicht grundsätzlich neue Verhaltensanforderungen. Allerdings werden gewisse Verhaltensanforderungen in einem neuen Kontext kontrolliert. So werden bei einem Wechsel des VHR andere Verkehrsteilnehmer, die den VHR bereits in longitudinaler Richtung befahren, beachtet. Durch die Erweiterung der Szenerie um einen lateral angrenzenden VHR, wie in Abbildung 4-22 dargestellt, ist es möglich, dass während des Übergangs des Egofahrzeugs gleichzeitig ein anderer Verkehrsteilnehmer einen lateralen Übergang anstrebt. Hierbei besteht keine genaue Definition des Vorrangs. Daher ist es notwendig, die Interaktion des Fahrzeugs mit anderen Verkehrsteilnehmern speziell in solchen Situationen zu überprüfen, um zu erkennen, ob das Egofahrzeug in der Lage ist, Kollisionen sowie eine Behinderung der Trajektorien zu vermeiden.

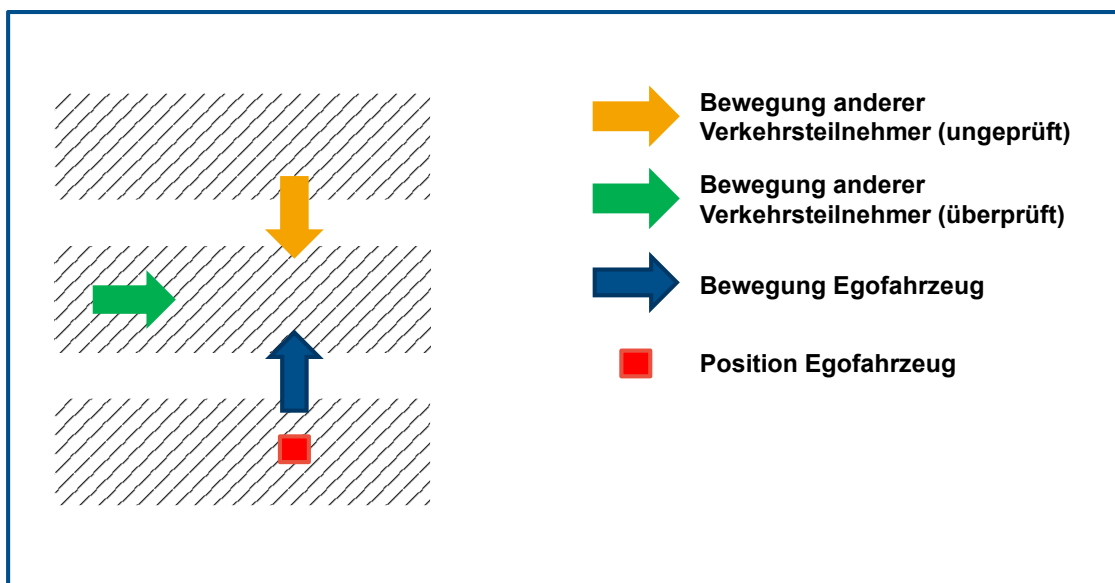


Abbildung 4-22: Lateraler Übergang mit möglichen Bewegungen anderer Verkehrsteilnehmer

Diese Aufweitung der Umgebung während verschiedener Manöver des Egofahrzeugs stellt sicher, dass neben den Anforderungen, die sich aus der Szenerie ergeben, ebenfalls Anforderungen, die sich aus der Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern ergeben, kontrolliert werden.

4.5.2 Dynamische Elemente

Um ein Szenario aufzubauen, ist es notwendig, dass dynamische Elemente sich innerhalb einer Szenerie bewegen. Dazu gehört, dass für diese eine initiale Positionierung sowie eine Zielvorgabe vorgenommen wird. Daneben wird für jede Art von Verkehrsteilnehmer betrachtet, welche Zustände er annehmen kann und welche Fähigkeiten er besitzt. Anschließend werden Bewegungen und Veränderungen innerhalb eines Szenarios durch Aktionen und Events definiert.

Dynamische Elemente lassen sich in verschiedene Untergruppen unterteilen. Einerseits sind dies bewegliche Elemente und nicht-bewegliche Elemente. Bewegliche Elemente verändern ihre Position entweder durch Eigenantrieb oder aufgrund von äußeren Einflüssen.

Unter die Kategorie der Elemente mit Eigenantrieb fallen unter anderem die Verkehrsteilnehmer, die auch im BSSD Konzept dargestellt werden. Zu Elementen mit Eigenantrieb gehören motorisierte Fahrzeuge, schienengebundene Fahrzeuge, Fahrradfahrer, Fußgänger sowie Tiere. Die Kategorie der beweglichen Elemente ohne Eigenantrieb wurde hinzugefügt, um zu berücksichtigen, dass der Raum, in dem sich das Egofahrzeug bewegt kein isolierter Bereich ist und es möglich ist, dass sich dort Gegenstände befinden und aufgrund der Umgebungsbedingungen bewegt werden. Als nicht-bewegliche Elemente, die trotzdem als dynamisch bezeichnet werden, fallen Elemente, die eine Zustandsänderung annehmen können. Hierzu zählen LSA und Wechselzeichen, die im Rahmen einer dynamischen Verkehrsflusssteuerung immer häufiger auftreten. Ziel dieser Arbeit ist insbesondere, eine regelkonforme Interaktion des Egofahrzeugs mit regulären Verkehrsteilnehmern zu überprüfen. Daher werden unzulässige Positionen oder Verhalten nicht berücksichtigt. Als reguläre Verkehrsteilnehmer werden die in BSSD berücksichtigten Verkehrsteilnehmer bezeichnet.

Um relevante Szenarien zu erzeugen, ist es notwendig, eine Positionierung von Verkehrsteilnehmern so vorzunehmen, dass sie möglicherweise das Verhalten des Egofahrzeugs beeinflussen. Um solch eine Relevanz sicherzustellen, wird sich bei der Bestimmung der Position sowie bei weiteren Aktionen im Verlauf des Szenarios an dem Egofahrzeug orientiert. Daher wird vor der Positionierung von anderen Verkehrsteilnehmern die Ausgangslage des Egofahrzeugs festgelegt. Zu dessen Ausgangslage gehört die initiale Position und Geschwindigkeit sowie dessen Ziel.

Hinzufügen des Egofahrzeugs

Das Egofahrzeug wird dabei immer an den Anfang eines Verhaltensraums im ersten Segment positioniert. Eine Einschränkung besteht darin, dass das Egofahrzeug nur in einen Verhaltensraum positioniert wird, in dem eine Eigenreservierung besteht oder eine Teilung des Reservierungsrechts mit einem Verkehrsteilnehmer, der sich in die gleiche Richtung wie das Egofahrzeug bewegt. Eine Positionierung in einem fremdreservierten Raum würde verschiedene Probleme erzeugen. So ist unklar, ob das Egofahrzeug sich in solche Positionen begeben würde. Daher würde damit die Möglichkeit bestehen, dass Szenarien überprüft werden, die so in der Realität nicht entstehen würden, was in einer reduzierten Effizienz der Methodik resultieren würde. Gleichzeitig ist es möglich, das Verhalten in fremdreservierten Räumen zu überprüfen, indem eine Fahrt ausgehend von einem eigenreservierten Bereich in einen fremdreservierten Bereich durch ein Szenario dargestellt wird. Neben der initialen Position wird auch das Ziel des Egofahrzeugs durch einen VHR angegeben. Dabei besteht das Ziel immer darin, bis zum Ende in longitudinaler Richtung des angegebenen VHR zu fahren.

Die Geschwindigkeit des Egofahrzeugs ist variabel innerhalb der Geschwindigkeitsbegrenzungen eines Verhaltensraums zu wählen. Allerdings ist eine initiale Überprüfung notwendig, ob die ausgewählte Geschwindigkeit auch für das Egofahrzeug erreichbar ist. Innerhalb des funktionalen Szenarios wird jedoch keine konkrete Geschwindigkeit und kein Raum an verschiedenen Geschwindigkeiten spezifiziert. Dies findet erst im Rahmen der Parametrisierung statt.

Die Positionierung des Fahrzeugs, dessen Geschwindigkeit und dessen Ziel werden innerhalb der Überklasse des Zustands festgehalten. Dadurch ist es möglich, über das gesamte Szenario hinweg die relevantesten Informationen des Egofahrzeugs abzurufen. Neben dem Initialzustand des

Egofahrzeugs werden auch dessen Fähigkeiten festgelegt. Ein weiterer wichtiger Faktor, der den Zustand des Fahrzeugs beschreibt, ist die mögliche Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern. Dies erfolgt analog beispielsweise durch die Lichtschaltung des Fahrtrichtungsanzeigers oder digital durch Vehicle-to-X Kommunikation.

Zu den Fähigkeiten gehören die fahrdynamischen sowie die sensorbedingten Limitierungen des Fahrzeugs. Unter fahrdynamischen Fähigkeiten werden die Maximalbeschleunigung und -verzögerung des Fahrzeugs verstanden sowie die maximale Geschwindigkeit, die das Fahrzeug in der Lage ist, zu erreichen. Im Bereich der Limitierung, die durch die Sensorik gegeben sind, wird die Sichtweite sowie der Sichtwinkel von Sensoren festgelegt. Dies ist nicht mit den Einschränkungen zu verwechseln, die für Sichtweite und Sichtwinkel im Rahmen der Szenerieerstellung vorgenommen wurden.

Tabelle 4-4: Initiale Zustände und Fähigkeiten des Egofahrzeugs

Initialer Zustand	Initiale Fähigkeiten
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Position <ul style="list-style-type: none"> ○ VHR ○ Position innerhalb des VHR ▪ Geschwindigkeit ▪ Ziel ▪ Kommunikation <ul style="list-style-type: none"> ○ Analog ○ Digital 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fahrdynamik <ul style="list-style-type: none"> ○ Max. Geschwindigkeit ○ Max. Beschleunigung ○ Max. Verzögerung ▪ Sensorik <ul style="list-style-type: none"> ○ Sichtweite ○ Sichtwinkel

Für das Egofahrzeug werden im Gegensatz zu anderen Verkehrsteilnehmern keine Aktionen definiert. Der Grund hierfür liegt darin, dass das Testobjekt in der Verhaltens- und Trajektorienplanung besteht. Dadurch ist es nicht möglich, gewisse Aktionen vorzugeben. Das Testobjekt wurde bisher keiner Validierung unterzogen, sodass auch keine begründbaren Annahmen über das konkrete Verhalten getroffen werden können. Aufgrund dieser Einschränkung ist es wichtig, dass sich die Aktionen anderer Verkehrsteilnehmer an dem Zustand des Egofahrzeugs orientieren, um eine Kreierung irrelevanter Szenarien zu verhindern.

Hinzufügen von motorisierten Verkehrsteilnehmern

Für die Bestimmung des Ausgangszustands von anderen Verkehrsteilnehmern wurde eine Kombinatorik entwickelt, um die verschiedenen Ausgangszustände, die ein motorisierter Verkehrsteilnehmer in Relation zum Egofahrzeug annimmt, darzustellen. Dabei ist es notwendig, zwischen Einspur und Zweispurfahrzeugen zu unterscheiden. Dies liegt daran, dass bei Einspurfahrzeuge aufgrund ihrer geringeren Breite ein zusätzlicher zu bestimmender Parameter entsteht. Dieser besteht in der Angabe, ob der Verkehrsteilnehmer einen VHR mit einem lateralen Versatz befährt.

In der folgenden Tabelle werden die unterschiedlichen Kombinationsmöglichkeiten, die zum Ausgangszustand von motorisierten Fahrzeugen führen, dargestellt. Diese Kombinationsmöglichkeiten gelten für motorisierte Verkehrsteilnehmer, die sich in dieselbe Richtung wie das Egofahrzeug

bewegen. Bei der Positionierung wird allerdings keine Positionierung in Relation zu VHR vorgenommen, sondern in Relation zu den Verhaltensraumsequenzen beziehungsweise vereinfacht gesprochen in Relation zum Fahrstreifen, auf dem sich das Egofahrzeug befindet. Für Einspurfahrzeuge wird zusätzlich berücksichtigt, ob das Fahrzeug lateral versetzt auf dem Fahrstreifen positioniert ist. Die Kombinationsmöglichkeiten sind in Tabelle 4-5 dargestellt. Die Differenzierung für Einspurfahrzeuge ist nicht in der Tabelle enthalten. Die Möglichkeiten zur Wahl der Geschwindigkeit und des Zielpunkts sind unabhängig von der Initialposition, während sich bei dem relativen Startpunkt Unterschiede ergeben. Dies liegt daran, dass ein motorisierter Verkehrsteilnehmer sich nicht auf derselben Höhe wie das Egofahrzeug befinden kann, wenn er denselben Fahrstreifen wie das Egofahrzeug belegt.

Tabelle 4-5: Mögliche Ausgangszustände von motorisierten Verkehrsteilnehmern

Initialposition	Startpunkt	Geschwindigkeit	Zielpunkt
Positionierung auf dem Fahrstreifen des Egofahrzeugs	Vor dem Egofahrzeug	Höhere Geschwindigkeit	Auf dem eigenen Fahrstreifen
	Nach dem Egofahrzeug	Gleiche Geschwindigkeit	Auf einem anderen Fahrstreifen
Positionierung auf anderem Fahrstreifen	Vor dem Egofahrzeug	Niedrigere Geschwindigkeit	
	Auf Höhe des Egofahrzeugs		
	Hinter dem Egofahrzeug		

Für Bewegungen von Verkehrsteilnehmern, die sich nicht in dieselbe Richtung wie das Egofahrzeug bewegen, findet die Festlegung des initialen Zustands auf andere Art und Weise statt. Für diesen Fall wird der Verkehrsteilnehmer an den Anfang einer Verhaltensraumsequenz positioniert. Die Geschwindigkeit wird zudem nicht relativ zum Egofahrzeug ausgewählt. Der Parameterraum in Bezug auf die Initialgeschwindigkeit wird durch die fahrdynamischen Fähigkeiten des Fahrzeugs bestimmt. Die Positionierung findet am Anfang des VHR statt, um sicherzustellen, dass ein Aufeinandertreffen des Egofahrzeugs mit dem motorisierten Verkehrsteilnehmer möglich beziehungsweise wahrscheinlich ist.

Die möglichen Zustände für motorisierte Fahrzeuge werden hier nicht näher beleuchtet, da diese dieselben Kategorien wie die des Egofahrzeugs besitzen, wobei die Sensorik für den Zustand von anderen motorisierten Fahrzeugen nicht relevant ist. Unterschiede in den Ausprägungen werden im Rahmen der Parametrisierung berücksichtigt.

Hinzufügen von schienengebundenen Verkehrsteilnehmern

Die Positionierung von *Railed Vehicles* erfolgt auf eine andere Art und Weise. Der wesentliche Grund dafür besteht darin, dass eine Positionierung dieser Art von Verkehrsteilnehmer nur in einem

begrenzten Teil der Szenerie möglich ist. Daher werden *Railed Vehicles* auch nicht relativ zum Egofahrzeug positioniert. Ein *Railed Vehicle* wird nur in einen VHR positioniert in dem es selbst ein Reservierungsrecht besitzt oder in einem *Non-Regular Motion Space*, das für Schienenfahrzeuge vorgesehen ist. Dies ist dann der Fall, wenn ein VHR fremdreserviert ist mit der *Reservation Class Railed Vehicle* oder wenn ein VHR eine gleichberechtigte Reservierung dadurch besitzt, dass neben dem Egofahrzeug auch schienengebundene Fahrzeuge den Raum befahren. Eine Positionierung ist auf einem dieser VHR möglich, während sich das Ziel am jeweiligen Ende der Sequenz an VHR für schienengebundene Fahrzeuge befindet. Die Geschwindigkeit von *Railed Vehicles* wird im Rahmen der Parametrisierung gewählt. Im Gegensatz zu motorisierten Verkehrsteilnehmern wird diese jedoch nicht in Relation zur Geschwindigkeit des Egofahrzeugs gewählt. Die möglichen Zustände des Fahrzeugs werden in Anhang C dargestellt.

Hinzufügen von Fahrradfahrern

Fahrradfahrer werden sowohl in VHR positioniert, die für motorisierte Fahrzeuge vorgesehen sind als auch in VHR, die speziell für die Nutzung von Fahrradfahrern vorgesehen sind. Dies sind zum einen VHR mit einer externen Reservierung für Fahrradfahrer sowie *Non-Regular Motion Spaces* für Fahrradfahrer. Die Positionierung von Fahrradfahrern erfolgt auf zwei unterschiedliche Arten und Weisen. In VHR beziehungsweise auf Fahrstreifen, die eine Eigenreservierung für motorisierte Fahrzeuge besitzen, werden Fahrradfahrer auf Basis derselben Kombinatorik wie Einspurfahrzeuge positioniert. Des Weiteren wird jedoch eine gesonderte Positionierung für Bereiche vorgenommen, die speziell für die Nutzung von Fahrradfahrern vorgesehen sind. Für diese Bereiche gilt, dass Fahrradfahrer je nach ihrer Fahrtrichtung an den Anfang oder das Ende des Bereichs, der für sie vorgesehen ist, positioniert werden. Dieser Bereich wird entweder durch *Non-Regular Motion Spaces* oder fremdreservierte VHR repräsentiert. Hintergrund dieser Differenzierung ist, dass dadurch sichergestellt wird, dass ein relevantes Szenario entsteht, bei dem es möglich ist, dass Verkehrsteilnehmer und das Egofahrzeug aufeinandertreffen. Dies lässt sich an einem Beispiel darstellen. Wenn das Egofahrzeug im Rahmen eines Szenarios in einen für Fahrradfahrer fremdreservierten VHR einfährt und sich der Fahrradfahrer am Anfang des Szenarios noch vor diesem VHR befindet, ist es möglich durch eine geeignete Parametrisierung des Szenarios sicherzustellen, dass Fahrradfahrer und Egofahrzeug aufeinandertreffen. Falls der Fahrradfahrer jedoch beispielsweise bereits in dem fremdreservierten VHR positioniert wird, ist es möglich, dass sich der Fahrradfahrer zu dem Zeitpunkt des geplanten Einfahrens des Egofahrzeugs nicht mehr in diesem Bereich befindet. Dadurch würde ein irrelevantes Szenario entstehen. Das Ziel für Fahrradfahrer, die in eigenen Bereichen positioniert sind, ist das Ende dieses Bereichs. Fahrradfahrer, die sich in Bereichen für motorisierte Fahrzeuge befinden, besitzen als Ziel das Ende eines beliebigen Fahrstreifens. Die Geschwindigkeit wird wie bei schienengebundenen Fahrzeugen im Rahmen der Parametrisierung durchgeführt.

Die möglichen Zustände und Fähigkeiten sind in Anhang C dargestellt.

Hinzufügen von Fußgängern

Als mögliche Positionen für Fußgänger werden die Bereiche vorgesehen, die speziell für die Nutzung von Fußgängern festgelegt sind. Dies sind zum einen die *Non-Regular Motion Spaces*, die zu

Verhaltensräumen führen, die für Fußgänger reserviert sind. Zum anderen sind es diese Verhaltensräume, die speziell für Fußgänger reserviert sind. Im Gegensatz zu Fahrradfahrern wird für Fußgänger keine Positionierung oder Bewegung auf Flächen für motorisierte Fahrzeuge vorgesehen. Nach §25 StVO wird bestimmt, dass „wer zu Fuß geht, die Gehwege benutzen muss“⁸⁶. Zwar wird diese Regel dadurch eingeschränkt, dass es erlaubt ist, die Fahrbahn zu betreten, falls kein Gehweg vorhanden ist. Dies ist jedoch keine genaue Spezifikation und erlaubt nicht ein generelles Betreten der Fahrbahn. Die Kombinationen zur Positionierung von Fußgängern sind in Tabelle 4-6 dargestellt.

Der Zustand eines Fußgängers wird nur durch dessen Position und Geschwindigkeit dargestellt, während Fähigkeiten bei Fußgängern nicht in dem Maße wie beispielsweise bei dem Egofahrzeug relevant sind.

Tabelle 4-6: Mögliche Ausgangszustände von Fußgängern

Dimension	Ausprägungen			
Belegung der Bereiche	Frei	Stehender Fußgänger	Schneller Fußgänger	Langsamer Fußgänger

Definieren von Aktionen und Events

Aktionen dienen dazu, das Verhalten oder die Trajektorie von Verkehrsteilnehmern innerhalb eines Szenarios zu beschreiben. Dies hängt von dem Abstraktionsgrad der Aktionsdarstellung ab. Es wurde bereits festgestellt, dass eine Relevanz von Szenarien dadurch sichergestellt wird, dass die Bewegungen von Verkehrsteilnehmern sich an der Position des Egofahrzeugs orientieren.

Schuldt definiert eine Aktion so, dass sie einen Teil eines Manövers darstellt, das Start- und Endbedingungen besitzt⁸⁷. Diese Definition eignet sich für die Vorhaben in dieser Arbeit, da durch das Nutzen von geeigneten Bedingungen eine Relevanz von Aktionen sichergestellt wird. Diese Definition wird noch dadurch erweitert, dass im Rahmen einer Aktion die Angabe eines (Ziel-)Orts möglich ist, um zu spezifizieren in welche Richtung sich ein Verkehrsteilnehmer bewegt.

In der Literatur wird zwischen absoluten und relativen Manövern unterschieden. Absolute Manöver orientieren sich in longitudinaler Richtung rein an der eigenen Geschwindigkeit während in lateraler Richtung eine Ausrichtung anhand der Fahrstreifen stattfindet⁸⁸. Relative Bewegungen bezeichnen die Bewegung im Raum relativ zu einem anderen Fahrzeug. Sauerbier et al. spezifizieren solche Manöver, indem sie beschreiben aus welcher Richtung sich Verkehrsteilnehmer auf das Egofahrzeug hinbewegen und mit welcher Relativgeschwindigkeit sie diese Bewegungen ausführen⁸⁹.

⁸⁶ Bundesministerium für Justiz: Straßenverkehrsordnung, §25

⁸⁷ Schuldt, F.: Diss., Methodisches Testen von automatisierten Fahrfunktionen mit Hilfe von virtuellen Umgebungen (2017).

⁸⁸ Jatzkowski, I. et al.: Zum Fahrmanöverbegriff im Kontext automatisierter Straßenfahrzeuge (2021).

⁸⁹ Sauerbier, J. et al.: Definition von Szenarien zur Absicherung automatisierter Fahrfunktionen (2019).

Aktionen von Verkehrsteilnehmern werden in dieser Arbeit als absolute Manöver dargestellt. Relative Manöver hingegen eignen sich dafür, Szenarien zu kategorisieren. Durch Kombinationen an absoluten Aktionen verschiedener Verkehrsteilnehmer ist es möglich, relative Manöver darzustellen. Relative Manöver, die sich für eine Kategorisierung eignen, sind in Anhang E dargestellt.

Aktionen von motorisierten Fahrzeugen werden in laterale und longitudinale Aktionen unterteilt. In longitudinaler Richtung ist es für Fahrzeuge möglich zu beschleunigen, die Geschwindigkeit zu halten oder zu verzögern. In lateraler Richtung ist es möglich die Position lateral zu den Verhaltensraumgrenzen zu halten, die Position lateral im VHR zu verschieben und die Position so zu verschieben, dass lateral in einen anderen VHR übergegangen wird. Für Fahrradfahrer bestehen die gleichen Aktionen. Differenzen in dem fahrdynamischen Verhalten und den fahrdynamischen Grenzen werden während der Parametrisierung eines Szenarios berücksichtigt. Aufgrund des Charakters von schienegebundenen Fahrzeugen existieren für diese nur Aktionen in longitudinaler Richtung. In dieser Richtung bestehen dieselben Aktionen wie für motorisierte Fahrzeuge. Für Fußgänger werden zwei Aktionen definiert. Fußgänger können entweder stehen oder laufen.

Aktionen werden durch Startbedingungen ausgelöst. Klassischerweise werden dafür zeitliche oder ortsgebundene Bedingung ausgewählt. Es bietet sich jedoch an, Bedingungen innerhalb dieser Szenarien so auszugestalten, dass diese sich an der relativen Position zum Egofahrzeug orientieren. Beispielsweise orientiert sich das Betreten eines Fußgängerüberwegs durch einen Fußgänger an der Entfernung des Egofahrzeugs sowie an der Geschwindigkeit, mit der sich das Egofahrzeug auf den Fußgängerüberweg zubewegt. Im Rahmen von Gesprächen mit Moritz Lippert und Björn Klamann wurden erste Ideen für mögliche Bedingungen, die sich an dem Verhalten des Egofahrzeugs orientieren, entwickelt.

Daraus entstanden verschiedene Bedingungen, um diese Ausrichtung am Egofahrzeug zu formalisieren. Ein geeignetes Kriterium hierfür besteht in der Time-to-Collision (TTC). Dieses Maß wird durch folgende Formel ausgedrückt:

$$\tau_{TTC} = \frac{d}{v_{rel}} \quad (1)$$

Die Distanz zwischen beiden Verkehrsteilnehmern in longitudinaler Richtung wird durch d beschrieben, während die Relativgeschwindigkeit durch v_{rel} angegeben wird. Zudem wird ein weiteres Maß eingeführt, das speziell an der Struktur von BSSD ausgerichtet ist. Dieses Maß wird als Time-to-Enter (TTE) bezeichnet. Damit wird die Zeit bezeichnet, die, ausgehend von der momentanen Geschwindigkeit des Egofahrzeugs, verbleibt, bis das Egofahrzeug in einen bestimmten Verhaltensraum eintritt.

Die Endbedingungen sind oft damit verbunden, dass ein bestimmter Zustand erreicht wird. Dieser Zielzustand wird beispielsweise durch eine Zielgeschwindigkeit, einen Zielraum oder ein Zielverhalten ausgedrückt. Dabei ist es auch möglich, die Endbedingung an das Egofahrzeug zu koppeln, um einen Abstand oder eine Relativgeschwindigkeit sicherzustellen.

Des Weiteren werden einige Randbedingungen für das Verhalten von Verkehrsteilnehmern gesetzt. Diese gelten insbesondere für motorisierte Verkehrsteilnehmer. So werden zur Sicherstellung der

Relevanz eines Szenarios keine Szenarien beachtet, in denen ein Fahrzeug mit einer höheren Geschwindigkeit als das Egofahrzeug fährt, während es sich in einer gewissen Distanz vor dem Egofahrzeug befindet. Solch ein „Wegfahren“ erzeugt keine weiteren Anforderungen an die Verhaltensplanung. Dasselbe gilt für eine Situation, in der ein Verkehrsteilnehmer sich in longitudinaler Richtung weit hinter dem Egofahrzeug befindet, während der Teilnehmer sich langsamer als das Egofahrzeug bewegt. Für beide Randbedingungen ist perspektivisch notwendig, eine Distanz festzulegen, ab der solch eine Randbedingung gültig ist.

Events beschreiben Veränderungen innerhalb eines Szenarios, die nicht durch Aktionen dargestellt werden. Im Wesentlichen sind hiervon Zustandsänderungen betroffen. Daneben werden auch Veränderungen der Umgebung spezifiziert. Relevante Änderungen, die nicht durch Aktionen beschrieben werden, betreffen die Änderung der Fähigkeiten von Verkehrsteilnehmern sowie die Zustandsänderungen von LSA. Der Zustand einer LSA gibt Auskunft über das momentan ausgegebene Signal und beeinflusst somit das Verhalten von Verkehrsteilnehmern. Der Zeitpunkt des Eintretens eines Events wird wie bei Aktionen durch Startbedingungen festgelegt. Im Gegensatz zu Aktionen werden allerdings keine Endbedingungen definiert.

4.5.3 Bestimmung eines Formats zur Informationsspeicherung

Es ist notwendig, die Informationen zu einem erarbeiteten Szenario abzuspeichern. Dafür existiert eine Reihe verschiedener Möglichkeiten. Grundsätzlich lassen sich diese Möglichkeiten in drei Kategorien unterteilen. Dies sind semantische Beschreibungen, grafische Beschreibungen und Abspeicherungen der Szenariodaten in einem informationstechnischen Format.

Eine semantische Beschreibung enthält eine Formalisierung der Beschreibung von einzelnen Elementen innerhalb eines Szenarios. Zusätzlich würden die einzelnen Ausprägungsmöglichkeiten festgehalten werden, damit eine vollständige semantische Darstellung des Szenarios umsetzbar ist. Ein Vorteil dieses Formats besteht darin, dass es für Menschen lesbar ist. Gerade in einem Umfeld, in dem verschiedene Entwickler an einem Prozess beteiligt sind, kommt dieser Vorteil besonders stark zum Tragen. Nachteilhaft wirkt sich aus, dass diese Form der Beschreibung nicht direkt von einem Programm wie die, die in der Implementierung genutzt werden, verarbeitbar ist. Eine grafische Beschreibung würde bei der Beschreibung eines Szenarios so aussehen, dass ein Szenario stückweise durch die Entwicklung einzelner Szenen dargestellt wird. Ein Vorteil dieser Form der Informationsspeicherung besteht in seiner Verständlichkeit. Allerdings wirkt sich die Limitierung der Beschreibungsmöglichkeiten negativ aus. Konkret bedeutet dies, dass nicht alle Informationen eines Szenarios in einer Grafik dargestellt werden. So sind beispielsweise Zustandsänderungen schlecht grafisch darstellbar. Die letzte Form der Szenariobeschreibung beschreibt ein Format, das Informationen in einer maschinenlesbaren Sprache abspeichert. So besteht die Möglichkeit, die oben erstellten Szenarien in einem XML ähnlichen Format abzuspeichern. Des Weiteren existieren bereits Formate, die spezifisch für den Aufbau von Szenarien entwickelt wurden. Bock et al. entwickeln so eine domänenspezifische

Sprache, um die Entwicklung von Szenarien für Maschinen verarbeitbar zu machen⁹⁰. Solch ein domänenspezifisches Modell wird ebenfalls im Rahmen des OpenScenario Formats. Dieses Format basiert auf einer XML-Struktur und ermöglicht es, Szenarien verschiedener Detaillierungsgrade zu erstellen. Ein wesentlicher Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass ein definierter Arbeitsfluss zur Erstellung eines Szenarios implizit durch das Format festgelegt wird. So wird zudem eine einheitliche Beschreibung von Szenarien sichergestellt. Andererseits wirkt sich die Nutzung eines bereits bestehenden Formats negativ auf Variierbarkeit während der Szenarioerstellung aus.⁹¹

Funktionale Szenarien in dieser Arbeit werden semantisch beschrieben. Aufgrund der bereits bestehenden semantischen Beschreibung der Szenerie durch BSSD bietet es sich an, diese als Ausgangspunkt für die Beschreibung des Szenarios zu nutzen. Zudem wird die Implementierung später in einem Format vorgenommen, das nicht speziell für die Kreierung von Szenarien entwickelt wurde, sodass eine Abspeicherung im informationstechnischen Format nicht in Frage kommt.

Das Netz an VHR sowie *Non-Regular Motion Spaces* wird so beschrieben, dass die Anzahl an Segmenten sowie die Anzahl an VHR in jedem Segment festgelegt wird. Zudem wird bereits zu diesem Zeitpunkt entschieden, ob eine Variation der Systemeingänge stattfindet, um Umwelteinflüsse zu repräsentieren.

Im Anschluss werden die Ausprägungen einzelner VHR semantisch beschrieben. Dies geschieht durch die Nutzung von Attributen aus BSSD. Für eigenreservierte VHR ist es möglich, dass ein Verkehr quer zum VHR eingefügt wird, um beispielsweise eine Kreuzung zu repräsentieren. Falls dies der Fall ist, werden zum Streckennetz weitere VHR hinzugefügt. Um zu verdeutlichen, dass ein VHR sich mit einem anderen VHR einen geographischen Raum teilt, wird eine weitere Klasse eingeführt: *Co-Owners*. Die VHR, die sich einen Raum teilen, referenzieren auf dieses Attribut, um darzustellen, dass sie sich einen Raum teilen. Für den Fall, dass eine Fremdreservierung eines VHR vorliegt, ist es notwendig Räume hinzuzufügen, auf die die *Reservation Links* verweisen. Dies sind sowohl die Räume, aus denen die Verkehrsteilnehmer stammen sowie die Räume, in die sie sich hineinbewegen. Die Attribute dieser Räume werden auch wiederum semantisch beschrieben, falls es sich um VHR handelt. Bei *Non-Regular Motion Spaces* findet bei funktionalen Szenarien keine weitere Spezifikation statt. Nachdem dieser Schritt abgeschlossen ist, werden die dynamischen Elemente und ihre Ausgangszustände beschrieben. Dazu gehört deren Position, deren Ziel und deren Ausgangsgeschwindigkeit. Dabei ist es zulässig, dass die Geschwindigkeit des Egofahrzeugs als eine der wenigen Elemente bereits spezifiziert werden, während die Geschwindigkeiten und Positionen der anderen Elemente sich an den möglichen Ausgangszuständen aus Kapitel 4.5.2 orientieren. Der letzte Schritt der Szenariobeschreibung besteht in dem Aufbau eines Katalogs zur Spezifikation von Aktionen sowie Events. Der Katalog orientiert sich an deren zeitlichen Abfolge und wird daher als Ablaufkatalog bezeichnet. Aktionen referenzieren jeweils auf den ausführenden Verkehrsteilnehmer, das absolute Manöver, einer Ortsangabe des Manövers sowie einer Start- und Endbedingung der Aktionen. Events repräsentieren Änderungen von Zuständen oder Fähigkeiten, die genauer beschrieben werden. Deren

⁹⁰ Bock, F. et al.: Textual Domain-Specific Languages for Scenario-Driven Development (2019).

⁹¹ ASAM e.V.: ASAM OpenSCENARIO: Version 2.0.0 Concepts (2020).

zeitlicher Zusammenhang zu anderen Aktionen basiert auf der Abfolge des Katalogs. Nachdem diese Beschreibung abgeschlossen ist, sind alle notwendigen Informationen zu einem bestimmten Szenario festgehalten. In Anhang F ist ein beispielhaftes funktionales Szenario festgehalten, das die Interaktion des Egofahrzeugs mit einem Fußgänger darstellt.

5 Methodik zur Generierung von Testfällen

Die Erstellung funktionaler Szenarien dient dazu, auf einer abstrakten Ebene Szenarien zusammenzufassen, indem sie auf eine Gleichheit der Verhaltensanforderungen überprüft werden. Testfälle werden jedoch in realen Szenarien durchgeführt. Daher werden abstrakte Szenarien in reale Szenarien übersetzt. Dies geschieht in einem zweistufigen Prozess. In einem ersten Schritt wird ein Parameterraum entworfen bevor dann in einem zweiten Schritt genaue Parameter für ein konkretes Szenario ausgewählt werden. Für den Entwurf des Parameterraums ist es notwendig, dass dazugehörige Diskretisierungsstufen konzipiert werden. Des Weiteren gehören zu jedem Testfall Testfallkriterien, die sich aus den Anforderungen an das Egofahrzeug ableiten. Das übergeordnete Testziel besteht dabei darin, Fehler beziehungsweise Unzulänglichkeiten des Systems zu identifizieren. Das Format zur Informationsspeicherung orientiert sich an der Gestaltung von funktionalen Szenarien. In Anhang G werden verschiedene Testfälle tabellarisch dargestellt.

5.1 Übersetzung funktionaler Szenarien in konkrete Szenarien

Bisher wurde keinerlei Festlegung über die geometrische Gestaltung der Szenerie getroffen. Diese geometrische Gestaltung wird in einem ersten Schritt vorgenommen, um einen Rahmen für weitere Konkretisierungen zu schaffen. Dazu gehört die Parametrisierung der Verläufe von Verhaltensraumsegmenten sowie einzelnen VHR, eine Beschreibung der Fahrbahnbeschaffenheit sowie die Parametrisierung der Geometrie von *Non-Regular Motion Spaces*. Die Übersetzung von funktionalen Szenarien in konkrete Szenarien erfordert eine Übersetzung der BSSD Attribute in reale Szenerieelemente. Entscheidender Vorteil dieser Form der Überprüfung der Verhaltens- und Trajektorienplanung ist, dass für jede funktionale Szenerie nur eine reale Szenerie erstellt wird. Das bedeutet, dass jedem BSSD Attribut einer Szenerie nur ein einziges entsprechendes reales Element entgegengestellt wird. Gleichzeitig ist es aber möglich, Aussagen zur Fähigkeit des Egofahrzeugs für alle Szenerien treffen, in denen die gleichen Verhaltensanforderungen bestehen. Außerdem ist es notwendig, die weiteren einem Szenario zugehörigen Elemente zu konkretisieren. Hierzu gehören dynamische Elemente, deren Zustände und Fähigkeiten sowie die Parametrisierung des Ablaufkatalogs.

5.1.1 Geometrische Gestaltung von Szenerien

Die Geometrie eines Verhaltensraums setzt sich aus dem Verlauf in drei Raumrichtungen zusammen. Da ein VHR Verhaltensanforderungen von Abschnitten einzelner Fahrstreifen darstellen, findet für die Parametrisierung von VHR eine Orientierung an gesetzlichen Vorgaben zum Aufbau von Fahrstreifen statt. Das Projekt UNICARagil konzentriert sich auf urbane Umgebungen. Daher werden die Richtlinien zur Anlage von Stadtstraßen (RASt) als Basis für geometrische Überlegungen herangezogen.

Länge von Verhaltensräumen

Die Länge von Verhaltensräumen ist in der Regel nicht begrenzt. Es gibt Ausnahmen dafür, die beispielsweise Fußgängerübergänge betrifft. Solche Limitierungen werden im weiteren Verlauf des

Kapitels erläutert. Ansonsten besitzen nur extern reservierte Bereiche für Schienenfahrzeuge eine begrenzte Länge. Diese orientiert sich an den Dimensionen von Schienenfahrzeugen, die bei der Parametrisierung dynamischer Elemente definiert werden.

Breite von Verhaltensräumen

Da beim Wechseln von Fahrstreifen Verhaltensforderungen an ein Fahrzeug gestellt werden, überspannen VHR in ihrer Breite gesamte Fahrstreifen. Die Fahrstreifenbreite und damit die Breite von VHR in Städten hängt im Wesentlichen von der verfügbaren Straßenraumbreite, der Straßenart und den verschiedenen Verkehrsteilnehmern ab. Bei der Betrachtung der verschiedenen Breiten werden Minima und Maxima sowie Diskretisierungsstufen herausgearbeitet. Nach den RASt wird bei der Erstellung von Querschnitten unterschieden, ob es sich um einfache Fahrstraßen oder um Kreuzungen beziehungsweise Kreisverkehre handelt. So beträgt die Breite von Fahrstreifen an gewissen Kreuzungen, wie in Anhang H dargestellt, nur 3,0 m, während sie an Einfahrten in Kreisverkehren 3,5 m beträgt. In der Richtlinie für die Anlage von Stadtstraßen sind für verschiedene Verkehrslagen die Fahrstreifenbreiten festgelegt. Dabei variiert die Fahrstreifenbreite für Fahrzeuge zwischen 2,25 m und 3,75 m. Tabelle 5-1 stellt die Gesamtfahrbahnbreite für verschiedene zweistreifige Situationen dar. Daraus lassen sich verschiedene Fahrstreifenbreiten für die Parametrisierung ableiten. Diese werden anschließend in Tabelle 5-3 festgehalten.^{92a}

Tabelle 5-1: Querschnitte zweistreifiger Fahrbahnen^{92b}

Anwendungsbereich	Fahrbahnbreite	
	Hauptverkehrsstraßen	Erschließungsstraßen
Regelfall	6,50 m	4,50 m – 5,50 m
Mit Linienbusverkehr	6,50 m	6,50 m
Geringer Linienbusverkehr mit geringem Nutzungsanspruch	6,00 m	6,00
Geringe Begegnungshäufigkeit Lkw-Verkehr	5,50 m (bei verminderter Geschwindigkeit)	-
Große Begegnungshäufigkeit Bus- oder Lkw-Verkehr	7,00 m	-
Schutzstreifen für Radfahrer	7,50 m mit beidseitig 1,50 m für Schutzstreifen 7,00 m mit beidseitig 1,25 m Schutzstreifen bei beengten Verhältnissen	-

⁹² Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (2012). a: -; b: S.69

Auf der Grundlage von BSSD wird die gesamte Fahrbahn in Verhaltensräume unterteilt. Das bedeutet, dass auch Verhaltensräume, die für andere Verkehrsteilnehmer wie Fahrradfahrer, Fußgänger und den öffentlichen Verkehr reserviert sind, parametrisiert werden, wenn sie ein Teil der Fahrbahn sind. *Non-Regular Motion Spaces* werden jedoch nicht vollständig modelliert. Es werden nur die *Non-Regular Motion Spaces* modelliert, die eine Verbindung zwischen Verkehrsteilnehmern und der Fahrbahn modellieren. Darunter fallen beispielsweise die Zugänge zu Fußgängerüberwegen. Die Breite von Fahrradstreifen wird auch durch die RAS_t vorgegeben. In Tabelle 5-2 sind verschiedene Breiten von Fahrradstreifen dargestellt. Die in den Klammern dargestellten Nummern sind Alternativwerte, die unter Umständen genutzt werden. Die Breite von Fahrstreifen für schienengebundene Fahrzeuge variiert nach den Dimensionen dieser Fahrzeuge. Allerdings wird ein Wert von 3,5 m als Anhaltspunkt in den RAS_t genannt.

Tabelle 5-2: Straßenbegleitende Radwege^{93a}

Radweg	Regelbreite	Sicherheitstrennstreifen
Einrichtungsradschweg	2,00 m (1,60 m)	0,75 m (0,50 m) bei angrenzender Fahrbahn oder angrenzendem Längsparken, 1,10 bei Senkrecht und Schrägparkständen
Zweirichtungsradschweg	2,50 m (2,00 m)	0,75 m

Aus diesen Daten ist es möglich, verschiedene Fahrstreifenbreite für die unterschiedlichen Arten von Wegen zu erstellen. Durch die feine Aufgliederung in den RAS_t werden Diskretisierungsstufen bereits vorgegeben. Die gesammelten Diskretisierungsstufen für die Breite von Verhaltensräumen unterschiedlicher Verkehrsteilnehmer werden in Tabelle 5-3 festgehalten.

Tabelle 5-3: Sammlung der möglichen Fahrstreifenbreiten^{93b}

Verkehrsteilnehmer	Fahrstreifenbreiten in m				
Motorized Vehicles	2,25 m	2,75 m	3,00 m	3,25 m	3,50 m
Railed Vehicles	3,5 m (allerdings ist dies abhängig von Charakteristika des Zugs)				
Cyclists	1,25 m	1,5 m	1,6 m	2,00 m	2,50 m

Ausgestaltung von Fußgängerüberwegen

Neben Verhaltensräumen, die für die oben genannten Verkehrsteilnehmer reserviert sind, werden Fußgängerüberwege als Teil der Szenerie parametrisiert. Die Breite von Fußgängerüberwegen leitet sich aus der Fahrbahnbreite ab. Daher ist es nicht notwendig, diese zu spezifizieren. Allerdings ist es

⁹³ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (2012). a: S. 86; b: -

notwendig, die Länge von Fußgängerüberwegen sowie die Ausgestaltung von Mittelstreifen zum Schutz von Fußgängern zu spezifizieren.

Fußgängerstreifen sind in der Regel 4 m lang und dürfen eine Länge von 3 m nicht unterschreiten. An größeren Kreuzungen ist es außerdem möglich, längere Fußgängerüberwege zu nutzen, um die Sicherheit von Fußgängern sicherzustellen. Diese Verlängerung wird allerdings nicht näher spezifiziert, sondern erfolgt situationsspezifisch⁹⁴. Fußgängerinseln zwischen Fahrstreifen können in ihren Dimensionen variieren. Die Länge richtet sich nach der Länge des Fußgängerüberwegs. In der Breite reichen die Dimensionen von 2 m bis 3 m.

Bordsteine

Des Weiteren ist es notwendig, die lateralen Abgrenzungen der Fahrbahn zu parametrisieren. Konkret geht es um die Ausgestaltung von Bordsteinen. Die Variation der Höhe von Bordsteinen hat auch Folgen für die Ableitung der lateralen Grenze nach BSSD. Es existieren drei verschiedene Arten von Bordsteinen. Niedrige Bordsteine besitzen eine Höhe von 0 cm bis 4 cm, mittelhohe Bordsteine eine Höhe von 4 cm bis 6 cm und angehobene Bordsteine variieren in ihrer Höhe zwischen 8 cm und maximal 20 cm. Angehobene Bordsteinkanten werden nach BSSD-Terminologie mit dem *Crossing Type Not possible* gekennzeichnet. Die anderen Bordsteinformen besitzen auch eine Abgrenzungsfunktion der Fahrbahn gegenüber Fußgängerwegen beziehungsweise Non-Regular Motion Space, allerdings sind diese überfahrbar und werden daher nur mit dem *Crossing Type prohibited* gekennzeichnet.

Kurvenradien

Der Radius einer Kurve kann je nach Variation die fahrdynamischen Anforderungen einer Szenerie deutlich beeinflussen. Kurven können durch einfache Fahrbahnkrümmungen entstehen oder aber durch Kreisverkehrausfahrten und im Rahmen der Erstellung von Kreisverkehren. Kurvenradien bei Abbiegemanövern liegen bei minimal 8 m. Diese Abbiegemanöver fallen je nach Ausgestaltung der Kreuzung unterschiedlich aus. Auf Basis dieses Radius werden Diskretisierungsstufen hin zu einem Radius von bis zu 25 m gewählt. Die Kurvenradien bei Abbiegemanövern werden teilweise bewusst geringgehalten, um eine verringerte Fahrgeschwindigkeit von Fahrzeugen zu erzwingen, was in einer erhöhten Sicherheit vulnerabler Verkehrsteilnehmer resultiert.

Im Verkehr zwischen Knotenpunkten hängt der minimal zulässige Kurvenradius von der erlaubten Höchstgeschwindigkeit des Streckenabschnitts ab. Um zu verhindern, dass ein plötzlicher Lenkradwinkeleinschlag in einer Kurve notwendig ist, werden Kurven durch Klothoide eingeleitet. Diese ermöglichen ein allmähliches Hineinfahren in eine Kurve. Diese Vorgaben zur detaillierten Ausgestaltung werden in den RASt dargestellt⁹⁵. An Hauptverkehrsstraßen liegen die erlaubten minimalen Kurvenradien zwischen 80 m und 190 m bei respektive $50 \frac{km}{h}$ und $70 \frac{km}{h}$. Es werden keine Vorgaben bezüglich der Länge von Kurven gemacht.

⁹⁴ Ministerium für Verkehr: Leitfaden zur Anlage und Ausstattung von Fußgängerüberwegen (2019).

⁹⁵ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (2012), S. 75.

Fahrbahnbeschaffenheit und Fahrbahnsteigungen

Die Ausdetaillierungen zur Fahrbahnbeschaffenheit und zur Fahrbahnsteigung innerhalb einer urbanen Szenerie sind von begrenzter Bedeutung für die Verhaltens- und Trajektorienplanung. Urbane Steigungen sind streng limitiert, sodass sich daraus keine Relevanz für die Verhaltens- und Trajektorienplanung ergibt. Die Regelungen zu Steigungen durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) sind in Anhang H genauer erläutert, um deren geringe Relevanz aufzuzeigen.

Die Fahrbahnbeschaffenheit beeinflusst die Stabilität des Fahrzeugs. Daher ist sie für die Trajektorienplanung relevant, während sie keinerlei Bedeutung für die Verhaltensplanung innehat. Hierzu gehört auch die Berücksichtigung von geschwindigkeitsdämpfenden Maßnahmen wie Teilaufpflasterungen oder Plateaupflasterungen. Aus dem Kraftfahrtechnischen Taschenbuch von Bosch lassen sich verschiedene mögliche Straßendecken ableiten. Dort werden Großpflaster, Kleinpflaster, Beton und Asphalt und Schotter genannt, wobei unbefestigte Straßen mit im urbanen Umfeld eine untergeordnete Rolle spielen⁹⁶. Verschiedene Pflasterungen zur Geschwindigkeitsdämpfung sind in Anhang H festgehalten.

5.1.2 Übersetzung der funktionalen Szenerie

Im Folgenden werden den einzelnen BSSD Attributen und ihren Ausprägungen reale Szenerieelemente gegenübergestellt. Dabei ist es wichtig, zwischen der Übersetzung in eine reale Szenerie und der Übersetzung der funktionalen Szenerie in einer Simulationsumgebung zu unterscheiden. Die Darstellung von BSSD Attributen in der Simulationsumgebung in Kapitel 6 erfolgt über die Modellierung im Lanelet2 Format. Für die Übersetzung in eine reale Szenerie im Rahmen dieser Methodik werden nicht mehrere reale Äquivalente aufzustellen, sondern es genügt, einzelne reale Elemente aufzubauen. Durch eine zusätzliche Ausweitung auf mehrere, reale Ausprägungen würde die Anzahl an Parametern steigen, ohne gleichzeitig einen Informationsgewinn über das Verhalten des Egofahrzeugs bei gewissen Verhaltensanforderungen zu erlangen. Die BSSD Attribute werden in der realen Szenerie durch Fahrbahnmarkierungen, Verkehrsschilder sowie LSA dargestellt. Dabei wurde eine Sammlung von VZ und den gegenüberstehenden BSSD Attributen von Felix Glatzki bei FZD für eine initiale Orientierung genutzt.

Die Regeln zur Geschwindigkeitsbegrenzung werden durch Verkehrsschilder dargestellt. Diese werden am Rand der Fahrbahn positioniert.

Regeln zu einem Überholverbot (*Overtake*) werden in der realen Szenerie durch Fahrbahnmarkierungen sowie Verkehrsschilder umgesetzt. Ein geltendes Überholverbot wird durch durchgezogene Fahrbahnmarkierungen an den lateralen Grenzen sowie die die VZ 276 und 277 (nach StVO) angezeigt. Es ist nicht notwendig, Schilder, die ein Überholverbot oder eine Geschwindigkeitsbegrenzung markieren, zu Beginn jedes VHR zu positionieren. Dies ist nur dann erforderlich, wenn sich die Ausprägung dieses Attributs verändert.

⁹⁶ Dietsche, K.-H.; Reif, K.: Kraftfahrtechnisches Taschenbuch (2018).

Bei der Repräsentation von Reservierungen ist eine Differenzierung erforderlich. Zum einen wird nach dem Reservierungstyp unterschieden und zum anderen nach der Verkehrsteilnehmerklasse, für die eine Reservierung gilt.

Bei Eigenreservierungen wird unterschieden, ob es sich um eine Fahrt entlang einer Kante oder eine Fahrt an einem Knotenpunkt handelt. Bei Fahrten entlang einer Kante ist keinerlei Markierung der Eigenreservierung in der realen Szenerie notwendig. Bei Fahrten an Knotenpunkten ist es möglich, dass eine Reservierung aufgrund verschiedener Szenerieelemente entsteht. So werden Eigenreservierungen durch LSA repräsentiert. Zudem werden Eigenreservierungen durch Vorfahrtsschilder (VZ 306) dargestellt. Weitere Darstellungen sind nicht erforderlich.

Bei Fremdreservierungen wird zwischen den unterschiedlichen Arten von Verkehrsteilnehmern, die eine Reservierung besitzen, differenziert. Eine Reservierung für motorisierte Verkehrsteilnehmer wird entweder im Zusammenhang mit einem Stoppschild oder einem „Vorfahrt gewähren“ Schild dargestellt (oder ohne Markierungen aufgrund von Rechts-vor-Links). Die Form von VZ wirkt sich ebenfalls auf die Art der longitudinalen Grenze aus. Bei einer Reservierung für schienengebundene Fahrzeuge ist es möglich, dass diese durch das VZ 201 (Andreaskreuz) markiert wird. Ein lateral verlaufender Radfahrstreifen wird durch durchgezogene Fahrbahnmarkierungen dargestellt sowie eine Fahrbahnmarkierung, die Radfahrer illustriert. Ein Schutzstreifen wird dagegen durch eine unterbrochene Linie vom Verkehr für motorisierte Fahrzeuge abgetrennt. Quer zum Autoverkehr verlaufende Fahrradstreifen werden durch unterbrochene Markierungen abgegrenzt und eine farbliche Markierung des Streifens gekennzeichnet. Eine Reservierung für Fußgänger wird durch Markierungen der Fahrbahn sowie das VZ 350 dargestellt.

Verhaltensraumgrenzen in longitudinaler und lateraler Richtung können durch physische Grenzen, Fahrbahnmarkierungen und Verkehrsschilder dargestellt werden. Sowohl in laterale als auch in longitudinale Richtung entsprechen physische Barrieren dem *Crossing Type Not possible*.

Bei dem *Crossing Type Allowed* in longitudinaler Richtung ist keine Markierung erforderlich. Bei dem *Crossing Type Conditional* ist die Art von Markierung abhängig von der Art des *Conditional Types*. Zufahrtsbeschränkungen werden durch Verkehrsschilder festgelegt. Stoppschilder und LSA sind weitere reale Elemente, die solch einen Typ repräsentieren. Bei diesen Elementen kommen zudem durchgezogene Markierungen quer zum Fahrstreifen hinzu. Der *Crossing Type Prohibited* in longitudinaler Richtung wird nicht durch Fahrbahnmarkierung dargestellt, da solche Manöver durch Verkehrsschilder als verboten gekennzeichnet werden. Verkehrsschilder wie das VZ 267 „Einfahrt verboten“ stellen eine reale Ausprägung dieser Verhaltensraumgrenze dar.

In lateraler Richtung wird ein Verhaltensraum durch unterbrochene Linien abgetrennt, falls ein Übergang erlaubt ist und nicht an weitere Bedingungen geknüpft ist. Bei einem lateralen Übergang mit dem *Crossing Type Conditional* hängt die Markierung von der Art der Übertrittsbedingung ab. Bei Zufahrtsbeschränkungen bestehen ebenfalls unterbrochene Linien. Verkehrsschilder werden zur Markierung dieser Bedingung nicht zusätzlich positioniert, da diese nur am Anfang eines Segments mit solch einer Beschränkung aufgestellt werden. Der Übergang in Parkbuchten wird dagegen durch keinerlei Markierungen hervorgehoben. Auch wenn Parkbuchten mit einer Fahrstreifenmarkierung

existieren, so ist es nicht notwendig dies zu berücksichtigen, da eine Art von Markierung zur Darstellung, wie zu Anfang des Kapitels erwähnt, genügt. Der laterale *Crossing Type Prohibited* wird durch durchgezogene Fahrstreifen oder niedrige Bordsteine dargestellt. Mittelhohe oder angehobene Bordsteine als eine Art von physischer Barriere repräsentieren den *Crossing Type Not possible*.

5.1.3 Variation von Systemeingängen

In Kapitel 4.4.1 wurde bereits festgestellt, dass die Variation von Informationseingängen in das Modul der Verhaltens- und Trajektorienplanung sich auf zwei Faktoren konzentriert. Diese sind die Variation der Sichtweite und die Variation des Sichtwinkels.

Sichtweite

Zur Bestimmung von Parametern bezüglich der Sichtweite ist es notwendig, die maximale Sichtweite zu definieren und darauffolgend die möglichen Einflussfaktoren auf die Sichtweite sowie die Amplitude dieser Einflussfaktoren. Die maximale Sichtweite in einem offenen, flach verlaufenden Gelände beträgt mehrere Kilometer. In einem urbanen Umfeld ist die Sichtweite in der Regel kein einschränkender Faktor. Dies liegt daran, dass die für Fahrentscheidungen relevante Umgebung in einem urbanen Umfeld signifikant kleiner als die mögliche Sichtweite ist. Daher ist es legitim anzunehmen, dass im Regelfall sämtliche nicht verdeckten Objekte und Straßenverläufe durch das Fahrzeug zu erkennen sind. Einflüsse auf die Sichtweite haben das Wetter und die Tageszeit.

Tagsüber ist es möglich, eine uneingeschränkte Sichtweite anzunehmen. Die minimale Sichtweite, tageszeitbedingt, ergibt sich nachts. Durch die Nutzung von Scheinwerfern oder den Einsatz von Straßenbeleuchtungen ist es möglich, die Sichtweite zu verbessern⁹⁷. Laut Wördenweber beträgt die Sichtweite nachts für unbeleuchtete Objekte durch die Nutzung von Abblendlicht 60 m bis 120 m⁹⁸. Daher wird als Minimum der Sichtweite hier 60 m angenommen.

Das Wetter in Fahrzeugumgebung bildet den zweiten Einflussfaktor auf die Sichtweite. Durch Nebel sowie durch Regen wird die Sichtweite signifikant eingeschränkt. Dies geschieht, da Strahlen durch Tröpfchen des Regens oder des Nebels reflektiert werden und eine Dämpfung der Strahlen erfolgt. Weitzel hat in seiner Arbeit eine Klassifizierung verschiedener Einflüsse und der korrespondierenden Sichtweiten erstellt. Diese Klassifizierung ist in Tabelle 5-4 dargestellt. Bei Regen fällt die Sichtweite auf unter 200 m. Die Abschätzungen zu anderen Niederschlagsformen basieren auf der Arbeit von Eckert. Eckert differenziert zwischen Dunst und Nebel. Bei Dunst wird die Sichtweite auf 1 km bis 3 km limitiert. Diese Begrenzungen sind im urbanen Verkehr eher weniger relevant. Bei sehr dichtem Nebel fällt die Sichtweite zum Teil auf unter 50 m.⁹⁹

Aufgrund von Bremswegberechnungen bei üblichen Geschwindigkeiten im Stadtverkehr werden bei den weiteren Überlegungen Sichtweiten von über 100 m nicht weiter differenziert. Eine höhere

⁹⁷ Weitzel, D. A.: Kontrollierbarkeit nicht situationsgerechter Reaktionen umfeldsensorbasierter Fahrerassistenzsysteme (2013).

⁹⁸ Wördenweber, B. et al.: Automotive lighting and human vision (2007).

⁹⁹ Eckert, M.: Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr (1993).

Sichtweite zur früheren Erkennung von dynamischen Elementen bietet keinen Vorteil für die Verhaltens- und Trajektorienplanung.

Tabelle 5-4: Exposition von verschiedenen Arten von Niederschlag¹⁰⁰

Subklasse ($K = 2$)	Parameter	Definition		Exposition ρ	Bemerkung
		μ_{max}	Sichtweite		
Niederschlag	Kein ($q = 1$)	1	> 200 m	0,74	Basisanteil
	Regen ($q = 2$)	0,8	> 200 m	0,20	
	Schnee/Eis ($q = 3$)	0,15	> 200 m	0,03	
	Nebel ($q = 4$)	1	< 75 m	0,01	
	Rest ($q = 5$)	0,1	< 75 m	0,02	

Durch die Kombination von Regen beziehungsweise Nebel und einer Nachtfahrt ist es möglich, dass die Sichtweite noch weiter reduziert wird. Sichtweiten unter 50 m werden durch den Gesetzgeber reguliert. In solch einem Fall sind Autofahrer laut StVO dazu verpflichtet, maximal mit einer Geschwindigkeit von $50 \frac{km}{h}$ zu fahren¹⁰¹. Daher findet eine Parametervariation der Sichtweite bis unter 50 m statt, um die gesetzlichen Anforderungen sowie die fahrtechnischen Anforderungen abzuprüfen. Die Diskretisierungsstufen werden an dieser Stelle nicht weiter spezifiziert. Durch das Abprüfen des Worst-Case wird allerdings eine hohe Abdeckung erreicht, sodass im Bereich zwischen <50 m und 100 m wenige Diskretisierungsstufen ausreichen.

Sichtwinkel

Die Begrenzung des Sichtwinkels ist insbesondere dann relevant, wenn ein Bereich verdeckt ist, in dem sich andere Verkehrsteilnehmer aufhalten. Für die Verhaltens- und Trajektorienplanung ist es wichtig, dass sie nicht in Bereiche fährt, die nicht einsehbar sind. Zudem besteht die Anforderung, dass das Egofahrzeug erst in Kreuzungen hineinfährt, wenn es erkennt, ob aus anderen Richtungen möglicherweise Verkehrsteilnehmer eintreten. Der Begriff Kreuzung bezieht sich hierbei auf alle Arten von Räumen, in denen das Egofahrzeug auf andere Verkehrsteilnehmer trifft.

Bei der Verdeckung geht es darum, dass ein Ort festgelegt wird, ab dem es wieder möglich ist, in einen Bereich einzusehen und andere Verkehrsteilnehmer zu identifizieren. Dies kann durch eine Integration des Sichtwinkels in die Fähigkeiten des Egofahrzeugs implementiert werden. Dort wird dann beispielsweise bei der Anfahrt an eine Kreuzung festgelegt, dass keine Verkehrsteilnehmer aus anderen Armen erkannt werden. Das Ziel davon ist, das Verhalten des „Hineinkriechens“ in einer Kreuzung zu simulieren. Ab einem bestimmten Punkt in der Kreuzung wird anschließend ein Event definiert, ab dem das Egofahrzeug Informationen über andere Fahrzeuge hat. Wichtig hierfür ist das Bewusstsein des Egofahrzeugs, dass es einen bestimmten Bereich momentan nicht erkennt. Es ist

¹⁰⁰ Weitzel, D. A.: Kontrollierbarkeit nicht situationsgerechter Reaktionen umfeldsensorbasierter Fahrerassistenzsysteme (2013).

¹⁰¹ Bundesministerium für Justiz: Straßenverkehrsordnung. §3

notwendig, dass es perspektivisch möglich ist, diese Information in der Simulationsumgebung an das Fahrzeug zu übertragen.

5.1.4 Dynamische Elemente und deren Verlauf

Im Folgenden werden die mit verschiedenen Verkehrsteilnehmern verbundenen Parameter spezifiziert. Dies beinhaltet deren Dimensionierung sowie deren fahrdynamisches Verhalten. Hierbei werden motorisierte Fahrzeuge, schienengebundene Fahrzeuge, Fahrradfahrer und Fußgänger betrachtet. Zudem werden die Start- und Endbedingungen für Aktionen innerhalb des Szenarios näher beleuchtet.

Dynamische Elemente und deren Verlauf

Die Dimensionierung von motorisierten Fahrzeugen und Fußgängern wird im Rahmen der Implementierung vorgenommen. Eine Dimensionierung von öffentlichen Verkehrsmitteln findet anhand verschiedener Richtlinien statt.

Fahrzeugbreiten von öffentlichen Verkehrsmitteln betragen laut RASt 2,40 m bis 2,65 m^{102a}. Daher wird eine Breite von 2,65 m als genereller Wert der Fahrzeugbreite von öffentlichen Verkehrsmitteln angenommen und implementiert. Die Länge dieser Verkehrsteilnehmer variiert. So haben Busse gesetzlich vorgeschriebene Längen, die laut StVO 18,75 m bei Gelenkbussen nicht überschreiten dürfen¹⁰³. Straßenbahnen besitzen dagegen eine Länge von bis zu 75 m nach der Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung¹⁰⁴. Da diese Länge aber für die Umsetzung mancher Szenarien nicht praktikabel und auch nicht notwendig ist, werden geringere Längen von 13,5 m für Busse und für schienengebundene Fahrzeuge eine übliche Länge von 30 m angenommen¹⁰⁵. Fahrradfahrer benötigen laut RASt eine Ausdehnung von 0,8 m bis zu 1,3 m^{102b}.

Eine Sammlung der Maximalgeschwindigkeiten sowie Beschleunigungs- und Verzögerungswerte ist in Tabelle 5-5 zu finden. Diese Werten basieren auf Einschätzungen verschiedener Analysen, wobei sich die Maximalgeschwindigkeiten von motorisierten Fahrzeugen und schienengebundenen Fahrzeugen an den im Stadtverkehr zulässigen Geschwindigkeiten orientieren.

Die Trajektorie dynamischer Elemente innerhalb eines Szenarios wird durch eine initiale Zustandsbestimmung und die Definition von Aktionen und Events definiert. Die Positionierung von Verkehrsteilnehmern unterliegt verschiedenen Beschränkungen, die bereits bei der Generierung von funktionalen Szenarien berücksichtigt werden. Bei der Generierung von Testfällen geht es darum, eine exakte initiale Positionierung vorzunehmen. Verkehrsteilnehmer, die sich in Verhaltensräumen befinden, die dieselbe Referenzrichtung wie das Egofahrzeug besitzen, werden relativ zum Egofahrzeug positioniert. Neben den Verhaltensanforderungen aus der Szenerie werden Verhaltensanforderungen

¹⁰² Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (2012). a: S. 27; b: S. 28

¹⁰³ Bundesministerium für Justiz: Straßenverkehrsordnung. §32

¹⁰⁴ Bundesministerium für Justiz: Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung - BOStrab. §55

¹⁰⁵ Wirth, G.: Abmessungen von Straßenbahnen.

überprüft, die sich aus der relativen Position anderer Verkehrsteilnehmer während eines Fahrmanövers des Egofahrzeugs ergeben. Auf Basis dieser Überlegungen erfolgt eine konkrete Positionierung sowie eine Bestimmung der Bedingungen für Aktionen von anderen Verkehrsteilnehmern. Die Geschwindigkeit von Verkehrsteilnehmern wird so gewählt, dass diese im Parameterraum aus Tabelle 5-5 liegen.

Tabelle 5-5: Fahrdynamisches Profil verschiedener Verkehrsteilnehmer^{106,107,108,109, 110}

	Motorisierte Fahrzeuge	Schienengebundene Fahrzeuge	Fahrradfahrer	Fußgänger
Geschwindigkeit	0 - $20 \frac{m}{s}$	0 - $20 \frac{m}{s}$	0 - $10 \frac{m}{s}$	0 - $7 \frac{m}{s}$
Beschleunigung	0 - $6 \frac{m}{s^2}$	0 - $1,5 \frac{m}{s^2}$	0 - $2 \frac{m}{s^2}$	0 - $1,5 \frac{m}{s^2}$
Verzögerung	0 - $8 \frac{m}{s^2}$	0 - $1,5 \frac{m}{s^2}$	0 - $6,5 \frac{m}{s^2}$	0 - $1,5 \frac{m}{s^2}$

Die Bedingungen, die für den Eintritt von Aktionen oder Events aufgestellt werden, sind bei zeitlichen Bedingungen oder ortsgebundenen Bedingungen so zu erstellen, dass sie einen Einfluss auf andere dynamische Elemente haben. Testfälle mit verschiedenen Parameterausprägungen werden danach gruppiert, ob sie die gleichen potenziellen Auswirkungen auf andere dynamische Elemente besitzen. Allerdings besteht eine Schwierigkeit darin, dass unklar ist, wie sich das Egofahrzeug verhält. Damit besteht auch keine Sicherheit darin, ob eine Aktion oder Zustandsänderung einen Einfluss auf das Egofahrzeug besitzt. Daher werden konservative Annahmen getätigt, um Testfälle nicht fälschlicherweise auszuschließen. In dieser Arbeit werden solche Einschätzungen zur Relevanz auf Basis des Wissens des Autors getätigt. Zudem existieren Bedingungen, die an die TTC oder TTE geknüpft sind. Als Minimalwert für die TTC und die TTE wird 1,5 s angenommen. Diese Zahl orientiert sich an der Verarbeitungsdauer der Signalkette des Egofahrzeugs und stellt somit eine Art Reaktionszeit dar. Bei Werten unterhalb von 1 s würde daher keine Reaktion des Egofahrzeugs mehr erkennbar sein.

5.2 Bestimmung von Testfallkriterien

Wie in Kapitel 2.3.2 von Steimle et al. gefordert, wird ein Testfallkriterium aus den vorher entwickelten Anforderungen abgeleitet. Die Anforderungen, die an die Verhaltens- und Trajektorienplanung gestellt werden, wurden bereits während der Anforderungsanalyse beschrieben. Darauf aufbauend werden Bewertungskriterien entwickelt, die in Anlage D tabellarisch dargestellt sind. In dieser

¹⁰⁶ Zeppenfeld, B.: Durchschnittsgeschwindigkeit von Fahrradfahrern in Deutschland (2022).

¹⁰⁷ Lange, F.: VRR - Unfallrekonstruktion (2006).

¹⁰⁸ Institut für Unfallanalysen: Nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmer.

¹⁰⁹ Zębala, J. et al.: Pedestrian acceleration and speeds (2012).

¹¹⁰ SAE Technical Paper Series (2020).

Tabelle ist der direkte Zusammenhang zwischen jeder Anforderung und den daraus abgeleiteten Testfallkriterien ersichtlich.

Die gewählten Bewertungskriterien für die Verhaltensplanung repräsentieren Anforderungen, die ausschließlich auf Basis von BSSD entstanden sind. Allerdings ist die Bewertung der Trajektorienplanung mit weitergehenden Bewertungskriterien verbunden. Dadurch werden auch fahrdynamische Aspekte mitberücksichtigt, die für eine volle Erfüllung der Funktionalität erforderlich sind. So wird beispielsweise die Längs- und Querbewegung des Fahrzeugs gemessen, um zu erkennen, ob grundsätzlich fahrdynamische Grenzen des Fahrzeugs eingehalten werden und ob eine Trajektorie geplant wird, die eine komfortable Fahrt für Passagiere ermöglicht.

Diese Differenzierung zwischen den zwei Modulen ist notwendig, um anschließend präzise Aussagen über deren Funktionalität zu treffen. Es wäre möglich, dass die Verhaltensplanung richtige Entscheidungen trifft, die jedoch nicht vollständig korrekt von der Trajektorienplanung umgesetzt werden oder umgekehrt. Tabelle 5-6 stellt diese Differenzierung der Testfallkriterien zwischen den beiden Modulen dar. Allerdings existieren Kriterien, die zum momentanen Stand noch nicht trennscharf einem Szenario zugeordnet werden können. Dies liegt daran, dass eine klare Zuordnung der Funktionalitäten im Rahmen von *UNICARagil* teilweise noch aussteht. Ein Beispiel hierfür ist das Verhalten des Fahrzeugs beim Halten an einem Fußgängerüberweg. Es ist notwendig, Fußgängern durch ein Verzögern zu signalisieren, dass ihnen Vorrang gewährt wird. Ob diese Beeinflussung der Längsbewegung von der Verhaltensplanung oder der Trajektorienplanung umgesetzt wird, steht zum jetzigen Zeitpunkt nicht eindeutig fest.

Tabelle 5-6: Bewertungskriterien aufgeteilt nach Verhaltens- und Trajektorienplanung

Verhaltensplanung	Trajektorienplanung
Berücksichtigung von möglichen Einschränkungen und Vorgaben bei Verhaltensraumwechseln in longitudinaler und lateraler Richtung	Längsbewegung
Berücksichtigung von Reservierungsregelungen	Querbewegung
Berücksichtigung von Überholverböten	Abweichung von der Mitte des Fahrstreifens
Berücksichtigung von LSA	Abstand zu anderen Verkehrsteilnehmern
Berücksichtigung von anderen Verkehrsteilnehmern	Geplanter Weg bei Fahrstreifenwechseln
-	Berücksichtigung von Geschwindigkeitsbegrenzungen
-	Geschwindigkeitsdifferenz zu anderen Verkehrsteilnehmern bei Überholmanövern

6 Implementierung der Methodik

Dieses Kapitel beschreibt, wie das in den vorherigen Kapiteln entwickelte Konzept in einer Simulation implementiert wird. Dazu wird in einem ersten Schritt die Simulationsumgebung beschrieben, bevor der Aufbau und die Durchführung von Testfällen beschrieben werden. Um die Testfälle zu analysieren, werden die Simulationsdaten in verschiedenen Formaten abgespeichert und in MATLAB ausgewertet¹¹¹. Dieser Ablauf wird anhand verschiedener Testfälle anschließend veranschaulicht.

6.1 Aufbau der Simulation

Die Verhaltens- und Trajektorienplanung wird in ROS umgesetzt. Es ist wichtig zu berücksichtigen, dass weitere Module innerhalb der Simulationsumgebung aktiv sind und beispielsweise die Regelung des Fahrzeugs oder die Verarbeitung von Informationen über andere Verkehrsteilnehmer übernehmen. Diese anderen Module werden für die Überprüfung der Verhaltens- und Trajektorienplanung allerdings so umgesetzt, dass durch diese keine Einschränkungen oder Fehler innerhalb der Simulationsumgebung entstehen. Grundlage von ROS sind *Nodes*, die einzelne Funktionen darstellen. Zur Initialisierung der *Nodes* der Verhaltens- und Trajektorienplanung werden *Launch*-Dateien genutzt. Durch diese Art von Dateien werden sämtliche *Nodes* gleichzeitig gestartet. Zudem werden über diese Datei Parameter (wie beispielsweise die Maximalgeschwindigkeit des Egofahrzeugs) festgelegt, auf denen das Gesamtmodul basiert. Der Informationsaustausch zwischen einzelnen Funktionen findet so statt, dass Funktionen Informationen unter einem *Topic* veröffentlichen können. Wiederum andere Funktionen abonnieren dann dieses *Topic* und erhalten die darunter veröffentlichten Informationen. Dieses Prinzip wird in ROS als *Publish -Subscribe* Prinzip bezeichnet. Zusätzlich ist es möglich, Informationen aktiv bei anderen Funktionen abzufragen.¹¹²

Die Verhaltens- und Trajektorienplanung erhält Informationen aus zwei verschiedenen Quellen: einer Lanelet2 Karte sowie der Simulationsumgebung in IPG Carmaker.

In der Lanelet2 Karte werden Informationen über den Verlauf einzelner Fahrstreifen durch den Aufbau von *lanelets* abgespeichert. Daneben werden diesen *lanelets* Geschwindigkeiten, VZ und Vorrangregeln zugewiesen. So werden *lanelets* beispielsweise mit relevanten LSA verknüpft. Diese Informationen werden eingelesen und innerhalb der Module der Verhaltens- und Trajektorienplanung verarbeitet. Die initiale Pfadplanung findet auf Basis von Lanelet2 statt. Zudem wird die Position von anderen Objekten relativ zu *lanelets* angegeben.

Die Simulationsumgebung, in der sich das Egofahrzeug befindet, wird durch das Programm IPG Carmaker dargestellt. Die dort von Atlatec aufgebaute Szenerie ist ein Zwilling der Lanelet2 Karte in dem Sinne, dass sie die Szenerie aus der Lanelet2 Karte im selben geographischen Koordinatensystem virtuell darstellt. Des Weiteren werden die Eigenschaften des Egofahrzeugs definiert. So ist es möglich, die fahrdynamischen Fähigkeiten des Fahrzeugs zu verändern oder unterschiedliche

¹¹¹ Mathworks: MATLAB (2021).

¹¹² Stanford Artificial Intelligence Laboratory et al.: Robot Operating System (ROS) (2018).

Sensoren für das Fahrzeug zu nutzen. Die Umgebung, in der sich das Fahrzeug befindet, lässt sich über Szenarioeditoren in Carmaker anpassen. Dadurch werden innerhalb der erstellten Szenerie dynamische Elemente und deren zeitlicher Verlauf hinzugefügt.

Die Verbindung zwischen der Simulationsumgebung und dem Testobjekt wurde bereits im Rahmen des Projekts UNICARagil geschaffen und wird als Basis für die Durchführung von Testfällen genutzt. Das Programm IPG Carmaker besitzt eine Erweiterung, mit der es möglich ist, in Echtzeit in ROS Informationen über den Zustand des Egofahrzeugs und der Umgebung durch *Nodes* zu veröffentlichen. Gleichzeitig ist es über diese Erweiterung ebenfalls möglich, dass das Verhalten des Egofahrzeugs durch die Verhaltens- und Trajektorienplanung gesteuert wird, indem Carmaker Informationen empfängt und diese im Programm weiterverarbeitet.

Da sich das Modul der Verhaltens- und Trajektorienplanung in der Entwicklungsphase befindet, ist der Funktionsgrad des Moduls noch eingeschränkt. Zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit ist die Verhaltens- und Trajektorienplanung in der Lage, den Fahrstreifen zu halten und einen Fahrstreifenwechsel durchzuführen. Zudem besitzt es die Fähigkeit, auf dynamische Objekte zu reagieren. Das Planen eines Überholmanövers auf dem eigenen Fahrstreifen ist ebenfalls möglich. Daneben ist das Fahrzeug in der Lage, Geschwindigkeitsbegrenzungen zu berücksichtigen. Andere Funktionalitäten sind zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vorhanden, werden aber kontinuierlich entwickelt. Aufgrund dieser Einschränkungen fokussieren sich die Testfälle auf die beschriebenen vorhandenen Fähigkeiten.

6.2 Erstellung und Durchführung von Testfällen

Im Rahmen des Projekts UNICARagil wurden für verschiedene Areale der teilnehmenden Universitäten Lanelet2 Karten durch die Firma Atlatec erstellt. Neben diesen Lanelet2 Karten wurden für dieselben Areale Karten, in dem für Carmaker verarbeitbaren Format Road 5, erstellt. Dabei sind die Lanelet2 Karten ohne jegliche Einschränkung bearbeitbar. Auf der anderen Seite ist diese Fahrbahngeometrie im Road 5 Format nicht mehr veränderbar. Das bedeutet, dass es in der Carmaker-Umgebung nur möglich ist, weitere dynamische Elemente hinzuzufügen und deren Positionierung sowie zeitlichen Verlauf zu bestimmen. Dies ist unproblematisch, da die Verhaltens- und Trajektorienplanung Informationen zur Fahrbahngeometrie aus den Lanelet2 Karten entnimmt.

Daher wird in einem ersten Schritt die Lanelet2 Karte verändert, um einen erarbeiteten Testfall zu implementieren. Dafür wird der Editor Java OpenStreetMapEditor (JOSM) verwendet. Dieser Editor ist in der Lage, Dateien im OSM Format zu verarbeiten und visuell darzustellen. Da Lanelet2 auf diesem Format basiert, ist eine Darstellung dieses Formats in JOSM möglich. In JOSM stehen verschiedene Elemente zur Verfügung, die in einer Karte platziert werden können. Bei den gegebenen Elementen handelt es sich um für OSM vorgesehene Elemente. Das bedeutet, dass beispielsweise Polygone genutzt werden, um durch geeignete *Tags* Häuser darzustellen. Diese Art von bereits vorgesehenen Spezifizierungen wird als *Presets* bezeichnet. Es ist jedoch möglich, weitere eigene *Presets* hinzuzufügen. Solche *Presets* werden für Lanelet2 von Poggenhans et al, im Rahmen des Projekts

zur Verfügung gestellt¹¹³. Um Veränderungen in den Lanelet2 Karten vorzunehmen, werden *Nodes* hinzugefügt und zu *Ways* verbunden. Der Weg zwischen einzelnen Punkten wird dabei linear interpoliert. Die erzeugten *Ways* stellen *linestrings* beziehungsweise Fahrstreifenbegrenzungen dar. Anschließend werden rechte und linke Fahrstreifenbegrenzungen markiert und zu *lanelets* zusammengefasst. Durch die Zuweisung einer Rolle wird festgelegt, ob eine Fahrstreifenbegrenzung die rechte oder linke Abgrenzung darstellt. *Lanelets* stellen eigenständige Elemente dar, die durch das *Key-Value* Prinzip, wie in Kapitel 2.5.1 dargestellt, weiter spezifiziert werden. Dieses Verfahren wird auch als *Tagging* bezeichnet. Dadurch wird festgelegt, um welche Art von *Way* es sich handelt. Des Weiteren ist es möglich, abgegrenzte Gebiete durch *linestrings* zu definieren wie beispielsweise Parkplätze oder Verkehrsinseln. Regulatorische Elemente wie Geschwindigkeitsbegrenzungen sind essenziell, da die Verhaltens- und Trajektorienplanung sich an diesen Vorgaben orientiert. Dazu gehören auch Vorrangregelungen, die durch solche regulatorischen Elemente definiert werden. Laterale Grenzen werden durch eine Beschreibung der Linienart näher spezifiziert. Die möglichen Werte der *Presets* sind in Tabelle 6-1 dargestellt. Durch den Aufbau von *lanelets* und den in der Tabelle dargestellten Spezifikationen ist es möglich, eine an den Testfall angepasste Szenerie zu erstellen.

Tabelle 6-1: Spezifizierungsmöglichkeiten für *lanelets*

<i>Lanelets</i>	<i>Areas</i>	<i>RegulatoryElements</i>	<i>Linestrings</i>	<i>Traffic signs/lights</i>
<i>City roads</i>	<i>Vegetation</i>	<i>Traffic lights</i>	<i>Dashed Line</i>	<i>Traffic light</i>
<i>Two-way road</i>	<i>Pedestrian area</i>	<i>Right of way</i>	<i>Solid line</i>	<i>Generic traffic signs</i>
<i>Pedestrian way</i>	<i>Parking</i>	<i>Speed limit</i>	<i>Other line</i>	<i>Stop sign</i>
<i>Train rails</i>	<i>Keepout</i>	<i>Traffic sign</i>	<i>Road Border</i>	<i>Arrow</i>
<i>Emergency Lane</i>	<i>Building</i>	-	<i>Guard rail</i>	<i>Speed limit</i>
<i>Bike lane</i>	<i>Traffic island</i>	-	<i>Curbstone high</i>	-
-	<i>House exit</i>	-	<i>Curbstone low</i>	-
-	<i>Freespace</i>	-	<i>Fence</i>	-
-	-	-	<i>Wall</i>	-
-	-	-	<i>Virtual line</i>	-

Über JOSM ist eine direkte Verbindung zu den Servern von OSM möglich. Das bedeutet, dass Veränderungen, die in einer Karte vorgenommen werden, direkt in OSM hochgeladen werden können.

¹¹³ Poggenhans, F. et al.: Lanelet2.

Dies hat zur Folge, dass neu erstellte Elemente erst eine korrekten und einzigartige Identifikationsnummer (ID) erhalten, nachdem sie hochgeladen wurden. Allerdings wird nicht beabsichtigt, die selbst erstellten Szenerien hochzuladen. Dadurch ist es allerdings notwendig, auf eine andere Art und Weise den neu hinzugefügten Elementen valide IDs zuzuweisen. Hierfür existieren bereits Funktionen, die von Poggenhans et al. zur Verfügung gestellt werden. Daher wird das Paket Lanelet2, das aus GitHub stammt, genutzt¹¹⁴. Innerhalb dieses Pakets sind Funktionen in Python vorhanden, die solch eine Zuweisung von IDs vornehmen.

Nachdem die Erstellung der Karte im Lanelet2-Format abgeschlossen ist, wird im nächsten Schritt die Szenerie in IPG Carmaker angepasst und es werden dynamische Elemente hinzugefügt, falls dies für den vorliegenden Testfall notwendig ist. Dafür wird die korrespondierende Umgebung ausgewählt, was im Falle dieser Arbeit dem Flugplatzgelände in Griesheim entspricht. Wie bereits erwähnt ist es nicht möglich, Fahrstreifen innerhalb der Szenerie in Carmaker zu verändern oder weitere Fahrstreifen hinzuzufügen. Es ist allerdings möglich, weitere Elemente wie VZ oder LSA hinzuzufügen. Die Umgebung der Fahrbahn ist ebenfalls veränderbar.

Im Anschluss an die Gestaltung der Szenerie werden dynamische Elemente hinzugefügt. Hierzu gehört das Egofahrzeug, dessen Eigenschaften in Carmaker definiert werden. Hierzu gehört auch eine mögliche Veränderung der Sensorik. Dabei gibt es verschiedene Sensoren, die Carmaker zur Verfügung stellt. Grundsätzlich wird ein Sensor eingesetzt, der es dem Egofahrzeug ermöglicht, als „allwissender Beobachter“ Entscheidungen zu treffen. Das bedeutet, dass das Egofahrzeug zu jedem Zeitpunkt weiß, wo sich jeder Verkehrsteilnehmer befindet. Diese Fähigkeiten eines allwissenden Beobachters werden dann eingeschränkt, wenn eine Variation der Systemeingänge bei der Szenerie-beziehungsweise Szenariogenerierung festgelegt wird. Um den Verlauf verschiedener Verkehrsteilnehmer zu bestimmen, werden in Carmaker Routen aufgebaut. Diese werden so aufgebaut, dass Streckenabschnitte ausgewählt werden, die ein Verkehrsteilnehmer befährt oder im Falle eines Fußgängers begeht.

Das Egofahrzeug wird ebenfalls auf Basis solch einer Route positioniert. Im Gegensatz zu anderen Verkehrsteilnehmern wird die Route danach allerdings nicht mehr durch Vorgaben in Carmaker befahren, sondern orientiert sich ab dem Startpunkt an der Verhaltens- und Trajektorienplanung. Das Hinzufügen von anderen Verkehrsteilnehmern ist über den Verkehrseditor möglich. Wie beim Egofahrzeug wird auch anderen Verkehrsteilnehmern eine Route zugewiesen. Im Gegensatz zum Egofahrzeug wird das Verhalten dieser Verkehrsteilnehmer jedoch für den gesamten Szenarioverlauf festgelegt. Durch die Route ist der grundsätzliche Pfad von Verkehrsteilnehmern bereits festgelegt. Dieser Pfad ist jedoch parametrisierbar. Es ist beispielsweise möglich, einen lateralen Versatz einzustellen. Um die Trajektorie und nicht nur den Weg zu bestimmen, werden Manöver der Verkehrsteilnehmer definiert. Solche Manöver werden durch eine gewählte Geschwindigkeit und die Zeitdauer eines Manövers festgelegt. Dies stellt eine wesentliche Einschränkung für die Umsetzung von Testfällen dar. Dort sind für Aktionen bestimmte Startbedingungen festgelegt, die sich an dem Verhalten des Egofahrzeugs orientieren. Dem Autor dieser Arbeit ist nicht bekannt, dass solche Bedingungen

¹¹⁴ Poggenhans, F. et al.: Lanelet2.

in Carmaker implementierbar sind. Allerdings lässt sich diese Einschränkung dadurch umgehen, dass das Verhalten des Egofahrzeugs approximiert wird, um vergleichbare Bedingungen in Carmaker zu schaffen.

Nachdem die Simulationsumgebung für den jeweiligen Testfall geschaffen wurde, besteht ein letzter Schritt darin, dass eine *Launch*-Datei für den entsprechenden Testfall erstellt wird. In dieser Datei werden der Start- und der Zielpunkt des Egofahrzeugs in Form von *lanelet* IDs angegeben. Für ein erfolgreiches Starten der Simulation ist es wichtig, dass die durch die Launch-Datei vorgegebene Position mit der Startposition in Carmaker übereinstimmt. Wenn dies der Fall ist, wird die Simulation gestartet und durchgeführt. Während der Simulation kommuniziert die Verhaltens- und Trajektorienplanung mit der Simulation in Carmaker. Die Simulation wird beendet, wenn das Ende der Route erreicht wurde. Hierbei ist wichtig, dass auch der Zielpunkt in beiden Dateiformaten (Lanelet2 und Road 5) übereinstimmt, da sich das Ende der Simulation nach dem Erreichen des Zielpunkts in Carmaker ausrichtet.

6.3 Auswertung von Testfällen

Um Testfälle auszuwerten, ist es notwendig, Testfallkriterien aufzustellen und den Erfüllungsgrad dieser Kriterien durch die Verhalten- und Trajektorienplanung zu überprüfen. Die in der Implementierung genutzten Testfallkriterien betreffen die Einhaltung lateraler Grenzen, die Berücksichtigung von Geschwindigkeitsbegrenzungen sowie die Abstände, die zu anderen Verkehrsteilnehmern eingehalten werden. Für ein effizientes Testkonzept wird diese Auswertung neben einer visuellen Betrachtung durch eine automatisierte Auswertung unterstützt. Während der Testfalldurchführung werden Informationen über das Verhalten des Egofahrzeugs generiert. Diese Informationen werden in verschiedenen Formaten abgespeichert. In der Carmaker Simulation werden Daten im Carmaker spezifischen ERG-Format abgespeichert. Daneben beinhaltet die Kommunikation zwischen verschiedenen *Nodes* in ROS Informationen über die Bewegungen des Fahrzeugs. Dieser Informationsaustausch wird in *Rosbags* (.bag) gespeichert. Zusätzlich wird der Verlauf eines Testfalls in Carmaker visualisiert, der in mp4-Dateien abgespeichert wird. Für die Überprüfung verschiedener Testfallkriterien wie dem Einhalten lateraler Grenzen oder der Berücksichtigung von Geschwindigkeitsgrenzen, ist es notwendig, diese Eigenschaften des Streckenprofils aus den für Testfälle erstellten Lanelet2-Karten in MATLAB zu exportieren. In einem ersten Schritt wird die gesamte OSM-Karte eingelesen. Dafür wird ein bereits bestehendes, frei verfügbares Programm von Ioannis Filippidis genutzt¹¹⁵. Durch diese Funktionen entstehen Objekte, die *Ways* und *Nodes* repräsentieren. Die Funktionen stellen jedoch nicht weitere Elemente wie *lanelets* dar. Nachdem diese Grundelemente aus der Lanelet2 Karte abgespeichert wurden, werden als nächstes die Daten aus der *Rosbag*-Datei in MATLAB eingelesen. Auch für das Einlesen dieses Dateiformats wird auf bereits vorhandene, von MATLAB zur Verfügung gestellte, Funktionen zurückgegriffen. Durch dieses Einlesen werden die Wegpunkte des

¹¹⁵ Filippidis, I.: OpenStreetMap Functions (2022).

Egofahrzeugs abgespeichert. Zudem wird die Geschwindigkeit des Egofahrzeugs eingelesen. Dabei wird jedem Wegpunkt die momentane geplante Geschwindigkeit des Egofahrzeugs zugewiesen.

Wenn dieser Prozessschritt abgeschlossen ist, wird in einem nächsten Schritt bestimmt, welche *Ways* für den jeweiligen Testfall relevant sind. Dafür bestehen zwei verschiedene Vorgehensweisen. Es ist möglich, manuell die IDs der hinzugefügten Wege einzutragen, sodass sich eine Funktion diese Wege und die damit verbundenen Knotenpunkte herausucht. Alternativ ist es möglich, dass eingetragen wird, wie viele *Ways* im Rahmen der Testfallerstellung hinzugefügt wurden. Da diese sich am Ende der gespeicherten Daten befinden, ist es anschließend für eine Funktion möglich, diese in der Liste gespeicherten *Ways* zu identifizieren. Diese *Ways* repräsentieren die lateralen Fahrstreifenbegrenzungen. Daher wird in der darauffolgenden Funktion die Reihenfolge der *Ways* berücksichtigt, um anschließend für jeden Fahrstreifen die korrekten Fahrstreifenbegrenzungen aufzubauen. Im Anschluss an die Abspeicherung der lateralen Grenzen wird das erste Testfallkriterium überprüft. Dies geschieht unter Nutzung der *inpolygon* Funktion, die überprüft, ob sich ein Punkt innerhalb eines abgeschlossenen Raums befindet. Diese Funktion wird für sämtliche Wegpunkte genutzt. So ist es möglich, automatisiert zu identifizieren, ob bestimmte Wegpunkte laterale Grenzen in Szenarien verletzen, in denen dies nicht erlaubt ist. Neben dieser automatisierten Analyse wird der Verlauf des Fahrzeugs visualisiert, um zu erkennen, wie der Weg des Fahrzeugs auf dem Testgelände aussieht. Zusätzlich werden die Fahrstreifenbegrenzungen zur Orientierung dargestellt. Dafür wird die Mapping Toolbox von MATLAB verwendet. Diese enthält Funktionen, mit der geographische Punkte oder Verbindungen von Punkten auf Satellitenbildern darstellbar sind.

Nach der Überprüfung dieses ersten Testfallkriteriums werden separate Räume für Bereiche mit unterschiedlichen Geschwindigkeitsbegrenzungen erstellt. Dadurch ist es möglich, das zweite Testfallkriterium zu überprüfen. Die einzelnen Wegpunkte werden dem Bereich zugewiesen, dem sie angehören. Diese Wegpunkte besitzen jeweils auch eine mit ihnen assoziierte Geschwindigkeit. Diese Geschwindigkeit wird mit der im jeweiligen Bereich geltenden Geschwindigkeitsbegrenzung verglichen. Falls es zu einer Verletzung von Geschwindigkeitsbegrenzungen kommt, gibt die Testanalyse einen Fehler aus und der Test gilt als nicht bestanden. Zusätzlich wird ein Graph erzeugt, der den Geschwindigkeitsverlauf des Egofahrzeugs im Vergleich mit den erlaubten Geschwindigkeiten in den jeweiligen Bereichen darstellt.

Das dritte Testfallkriterium besteht in dem Einhalten eines ausreichenden Abstands zu anderen Verkehrsteilnehmern. Dabei ist insbesondere wichtig, dass keine Kollisionen entstehen. Der Abstand zu anderen Verkehrsteilnehmern wird separat in der Carmaker Simulation betrachtet. Hierzu wird das Programm IPG Control verwendet, das Abstände zu anderen Verkehrsteilnehmern visualisiert. Zusätzlich ist es möglich, diese Daten in eine CSV-Datei zu exportieren, um dort eine genauere Analyse vorzunehmen. In IPG Control wird der Abstand zu anderen Verkehrsteilnehmern allerdings als nicht vorhanden angegeben, wenn ein Verkehrsteilnehmer nicht im Sichtfeld eines Sensors ist. Eine Lösung hierfür besteht darin, dass ein Sensor beziehungsweise eine Sensorkombination verwendet wird, die die gesamte Simulationsumgebung abdeckt und somit alle Verkehrsteilnehmer erkennt. Alternativ wird ein Sensor verwendet, der nur einen bestimmten Sichtbereich abgedeckt und zusätzlich wird ein weiterer Datenpunkt kontrolliert, der angibt, ob ein Verkehrsteilnehmer im Sichtfeld des Sensors ist.

Nur wenn der Abstand nicht vorhanden ist und der Verkehrsteilnehmer erkannt wird, ist tatsächlich eine Kollision entstanden. Die Überprüfung dieser Testfallkriterien decken einen signifikanten Teil der Anforderungen an die bisher angegebenen Fähigkeiten ab. In Abbildung 6-1 ist der Ablauf der Testfallevaluation dargestellt.

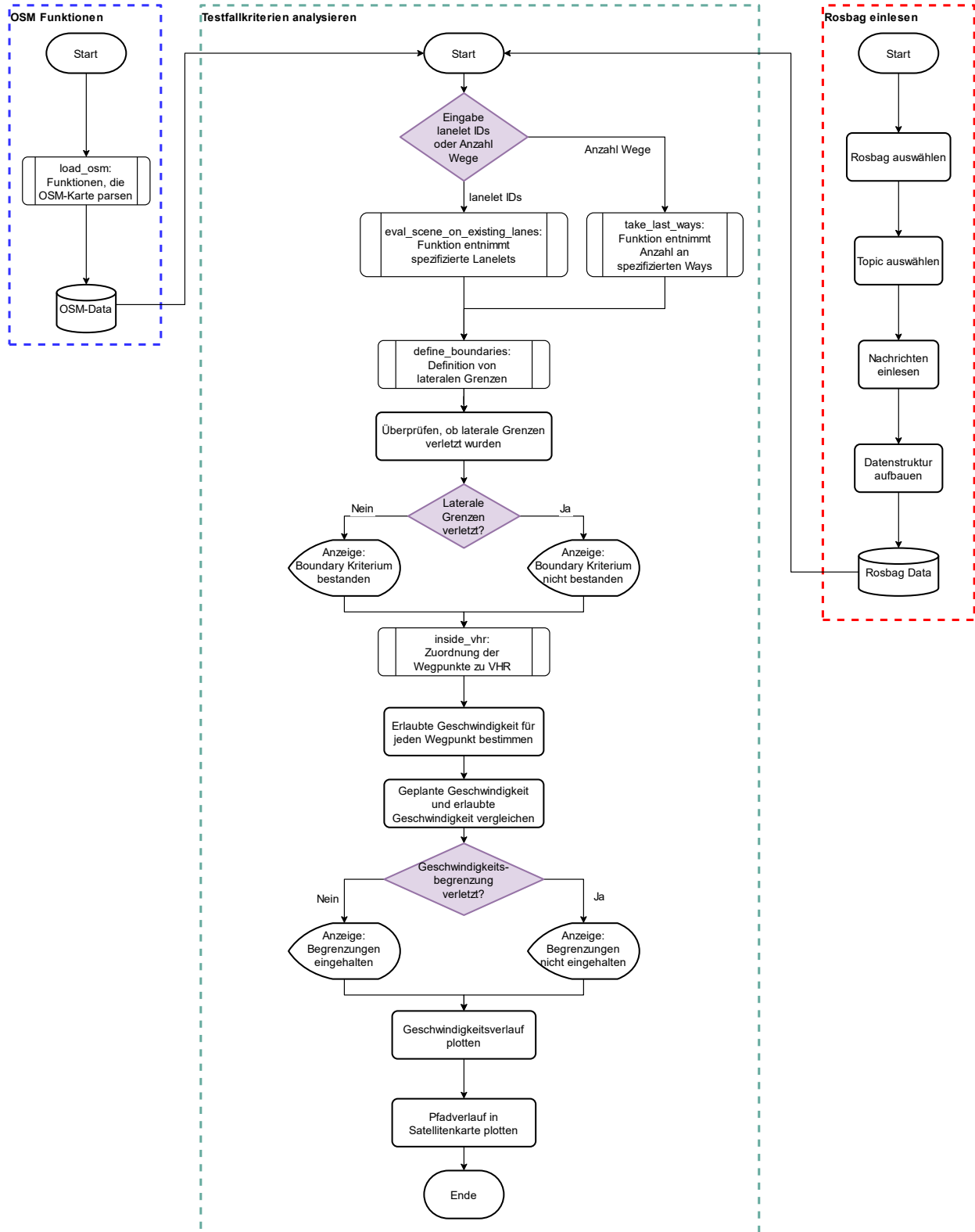


Abbildung 6-1: Programmablaufplan der Testfallauswertung

6.4 Durchführung und Auswertung verschiedener Testfälle

Im Folgenden werden drei beispielhafte Testfälle dargestellt. Dabei werden grundsätzliche Anforderungen überprüft. Es werden verschiedene Testfälle aufgebaut, um das Einhalten lateraler Grenzen sowie Geschwindigkeitsbegrenzungen zu überprüfen. Zudem wird das Verhalten gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern in verschiedenen Situationen überprüft. Das System, das zur Simulation verwendet wird, besitzt einen Intel® Core™ i5-6600K CPU @ 3.50GHz × 4 Prozessor. Aufgrund des hohen Rechenaufwands der Simulation werden Tests in Echtzeit durchgeführt, um die Korrektheit der Simulation sicherzustellen. Simulationen mit höheren Durchführungsgeschwindigkeiten erzeugen Probleme, die unabhängig von der Verhaltens- und Trajektorienplanung sind. Durch den Aufbau der Simulation und der Verhaltens- und Trajektorienplanung ist es notwendig, dass innerhalb eines Testfalls immer mindestens zwei *lanelets* befahren werden. Die Ursache hierfür liegt darin, dass das *lanelet* von dem aus gestartet wird nicht mit dem *lanelet* übereinstimmen darf, das als Ziel ausgegeben wird. Das bedeutet, dass es nicht möglich ist, in einem Testfall als Ziel festzulegen, dass das Egofahrzeug ein *lanelet* nur vom Anfang bis zum Ende befährt. Dies hat jedoch keine Auswirkungen auf die notwendige Anzahl an Verhaltensräumen, da zwei aufeinanderfolgende *lanelets* mit gleichen Verhaltensanforderungen erstellt werden. In Kapitel 4.5.1 wurde bereits beschrieben, welche Szenarien sich eignen, um die Einhaltung lateraler Verhaltensraumgrenzen zu überprüfen. Hierfür werden zwei *lanelets* in longitudinaler Richtung für eine erste Szenerie aufgebaut. Dieser Aufbau ist in Abbildung 6-2 dargestellt. Die neu erstellten *lanelets* sind dort rot markiert. Der Aufbau befindet sich auf dem Flugplatz in Griesheim auf dem Vorplatz des Hangars. Dort existieren weite Auslauflächen, sodass es sich dort auch anbietet, reale Testfälle in der Zukunft durchzuführen.

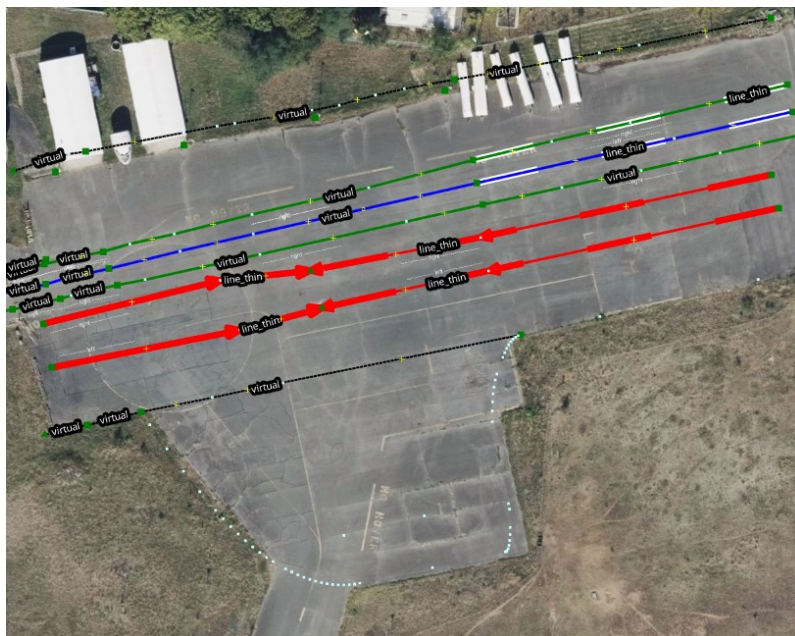


Abbildung 6-2: Aufbau von *lanelets* in JOSM^{116,117}

¹¹⁶ Scholz, I. et al.: JOSM (2022).

¹¹⁷ Microsoft Bing: BING Maps (2022).

Weitere Verkehrsteilnehmer sind innerhalb des Szenarios nicht vorhanden, sodass im Rahmen dieses Szenarios nur das Ziel besteht, die lateralen Verhaltensraumgrenzen nicht zu verletzen. Das Egofahrzeug befährt diese *lanelets* mit unterschiedlichen Attributen für die Fahrstreifenbegrenzung (*allowed* und *prohibited*), um zu überprüfen, ob es sich bei diesen Attributen korrekt verhält. Dabei zeigt sich, dass das Egofahrzeug in der Lage ist, die lateralen Grenzen wiederholbar in dieser Szenerie einzuhalten. Der Verlauf des Egofahrzeugs dort wird in Anhang I dargestellt.

Es werden jedoch weitere Testfälle auf dem Gelände des Griesheimer Flugplatzes durchgeführt, um beispielsweise auch bei Kurvenfahren zu überprüfen, inwiefern das Egofahrzeug laterale Grenzen einhält. Das Fahrzeug ist auch bei engen Kurven mit einer Krümmung von $\frac{1}{9m}$ in der Lage, laterale Grenzen einzuhalten. Dafür wurde derselbe Test insgesamt 10-mal bei unterschiedlichen Geschwindigkeitsbegrenzungen zwischen $5 \frac{km}{h}$ und $50 \frac{km}{h}$ wiederholt. Daraus lässt sich schließen, dass diese Fähigkeit durch das Egofahrzeug voll erfüllt wird.

Eine weitere Anforderung, die im Rahmen der Implementierung überprüft wird, ist die Einhaltung von Geschwindigkeitsbegrenzungen. In einem ersten Szenario erhalten beide *lanelets* die gleichen Geschwindigkeitsbegrenzungen. Diese variieren zwischen $5 \frac{km}{h}$ und $50 \frac{km}{h}$. Diese Testfälle werden anschließend in MATLAB ausgewertet. Dort zeigt sich, dass das Fahrzeug diese berücksichtigt und nicht verletzt. Daher wird diese grundlegende Anforderung erfüllt. In einem nächsten Szenario stellen die beiden *lanelets* zwei unterschiedliche VHR dar. In einem ersten Testfall, basierend auf diesem Szenario, besitzt der erste VHR eine höhere Geschwindigkeitsbegrenzung als der zweite VHR. Der erste VHR besitzt eine Begrenzung von $5 \frac{km}{h}$ und der zweite VHR erhält eine Begrenzung von $2,5 \frac{km}{h}$. Diese Werte werden genutzt, da sich dies anschließend für Versuche zur risikoarmen Inbetriebnahme in der Realität eignet. Das Egofahrzeug ist in der Lage, solche Geschwindigkeitswechsel von einer höheren Geschwindigkeit zu einer niedrigeren Geschwindigkeit zu berücksichtigen. Hier ist insbesondere wichtig, dass das Egofahrzeug schon vor Eintritt in den zweiten VHR abbremst, um dort nicht die niedrigere Geschwindigkeitsbegrenzung zu verletzen. In einem weiteren Testfall besitzt der zweite VHR eine höhere Geschwindigkeit als der erste VHR. Die Geschwindigkeiten bleiben bei $2,5 \frac{km}{h}$ und $5 \frac{km}{h}$. Hier zeigt sich, dass das Egofahrzeug konsequent zu früh anfängt, zu beschleunigen. Konsequenterweise bedeutet in diesem Zusammenhang, dass es möglich ist, diesen Testfall beliebig oft mit gleichem Ergebnis zu wiederholen. Abbildung 6-3 stellt dieses Verhalten dar. Es zeigt sich, dass das Egofahrzeug seine Geschwindigkeit bereits nach ungefähr 30 m von $2,5 \frac{km}{h}$ kontinuierlich auf knapp $4,6 \frac{km}{h}$ erhöht, obwohl der zweite VHR erst bei 61 m beginnt. Aus dem Verlauf lässt sich die Vermutung aufstellen, dass das Egofahrzeug in der Trajektorienplanung das Ziel besitzt, dass bereits beim Eintreten in einen neuen Abschnitt mit einer anderen Geschwindigkeit diese erreicht wird. Diese Regel ist allerdings nur dann relevant, wenn die Geschwindigkeit im folgenden Raum niedriger ist, da eine frühere Beschleunigung nicht erlaubt ist. Zwar stellt dies ein Verhalten dar, dass durchaus ebenfalls von Menschen gezeigt wird, trotzdem besteht die Anforderung an die Verhaltens- und Trajektorienplanung, dass diese StVO-konform plant. Daher wird dieser Testfall als nicht bestanden bewertet.

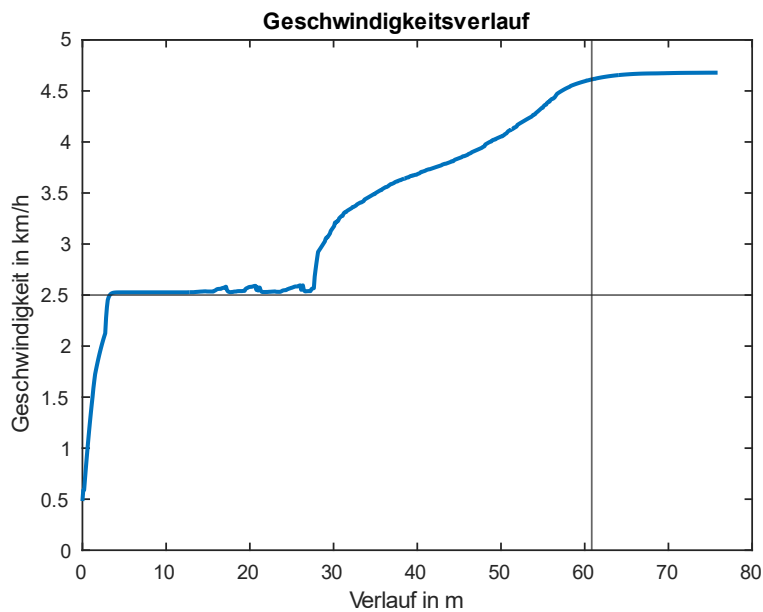


Abbildung 6-3: Darstellung des Geschwindigkeitsverlaufs

Weitere Testfälle dienen dazu, die Interaktion des Egofahrzeugs mit Verkehrsteilnehmern in verschiedenen Szenarien zu kontrollieren. So werden zwei Manöver des Egofahrzeugs überprüft. Auch wenn es nicht möglich ist, das Verhalten des Egofahrzeugs vorherzusagen, werden Szenarien generiert, die mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit ein gewünschtes Verhalten des Egofahrzeugs verursachen.

Ein Szenario besteht dabei aus einem eigenreservierten VHR, in dem sich ein Verkehrsteilnehmer vor dem Egofahrzeug befindet. Hierbei wird die Art des Verkehrsteilnehmers, die Anfangsdistanz zwischen Egofahrzeug und Verkehrsteilnehmer sowie die Relativgeschwindigkeit variiert. Aus diesen Variationen entstehen verschiedene Testfälle. Das Testziel besteht darin, das Annäherungsverhalten und Folgeverhalten des Egofahrzeugs zu betrachten und mögliche Fehler zu identifizieren. Es werden Relativgeschwindigkeiten von bis zu $50 \frac{km}{h}$ bei einem Minimalabstand getestet, der sich an der TTC orientiert. Dabei wird berücksichtigt, dass die Signalverarbeitungskette noch Optimierungsbedarf besitzt und daher ein hoher TTC-Wert bei Annäherungsmanövern eingesetzt wird ($TTC > 2$ s). In Anhang J sind unterschiedliche Ausprägungen dieser Testfälle dargestellt. Diese Testfälle werden sowohl auf den eigens erstellten *lanelets* durchgeführt als auch in Bereichen schon vorhandener *lanelets*. Es zeigt sich, dass das Egofahrzeug einen ausreichenden Abstand zu vorderen Verkehrsteilnehmern einnimmt und in der Lage ist, einem vorderen Verkehrsteilnehmer zu folgen. Erfolgreiche Verzögerungsmanöver wurden bei bis zu $43 \frac{km}{h}$ Relativgeschwindigkeit festgestellt. Bei höheren Relativgeschwindigkeiten zeigen sich noch Schwierigkeiten bei der Validierung der Planung. In Anhang I sind Verläufe der Relativgeschwindigkeit und des longitudinalen Abstands in einem Testfall zum Folgeverhalten des Egofahrzeugs dargestellt. Weitere Testfälle dienen zur Kontrolle, ob das Egofahrzeug in der Lage ist, andere Verkehrsteilnehmer im eigenen Fahrstreifen zu überholen. Dabei zeigt sich bei den Testfällen, dass sowohl für lateral versetzte Fahrzeuge als auch lateral versetzte Fahrräder das Egofahrzeug die Verkehrsteilnehmer nur überholt, wenn diese sich nicht bewegen. Bei einem

lateralen Versatz von 1,8 m auf einem 3,5 m breiten Fahrstreifen werden Fahrradfahrer mit einer Geschwindigkeit von $25 \frac{km}{h}$ nicht überholt. Erst bei einem Stillstand des Fahrradfahrers überholt das Egofahrzeug den Fahrradfahrer und hält dabei nicht den gesetzlich vorgeschriebenen Mindestabstand von 1,5 m ein. Daher wird dieser Testfall als nicht bestanden gewertet. Während eines Testfalls mit demselben Versatz eines Fahrzeugs und variierenden Relativgeschwindigkeiten verhält sich das Egofahrzeug in gleicher Weise und passiert nur ein stehendes Fahrzeug mit einem Abstand von nur 0,85 cm. Dieses Verhalten wird ebenfalls als unsicher klassifiziert.

6.5 Evaluation der Verhaltens- und Trajektorienplanung

Auf Basis der durchgeführten Testfälle ist es möglich, eine erste Bewertung über den Fähigkeitsgrad der Verhaltens- und Trajektorienplanung vorzunehmen. Die Testfälle zeigen, dass das Fahrzeug in der Lage ist, einen einzelnen VHR, in dem sich keine dynamischen Elemente befinden, zu befahren und dort die lateralen Grenzen einzuhalten sowie die Geschwindigkeitsbegrenzungen innerhalb eines VHR zu berücksichtigen. Dies ist auch in engeren Kreisverkehren der Fall, in denen die Trajektorienplanung zudem die Geschwindigkeit korrekt anpasst. In einzelnen VHR mit dynamischen Elementen ist sowohl das Annäherungs- als auch das Folgeverhalten des Fahrzeugs zufriedenstellend. Es wird ein im Verhältnis zur Geschwindigkeit ausreichender Abstand eingehalten (beispielsweise bei $10 \frac{m}{s}$ 39 m Abstand) und das Fahrzeug fängt bei einer Relativgeschwindigkeit früh an, zu verzögern, um eine Anpassung an die Geschwindigkeit des vorderen Verkehrsteilnehmers vorzunehmen (in Anhang I zu sehen). Des Weiteren wird überprüft, inwiefern das Egofahrzeug in der Lage ist, Überholmanöver durchzuführen. Dazu werden Testfälle mit unterschiedlich breiten VHR erstellt. Das Egofahrzeug überholt einzelne Verkehrsteilnehmer, die mit einem lateralen Versatz und geringerer Geschwindigkeit denselben VHR befahren, nicht. Erst wenn diese Verkehrsteilnehmer zum Stillstand kommen, überholt das Egofahrzeug diese. Die Überholmanöver finden jedoch nur bei einem geringen Abstand in lateraler Richtung statt, sodass das zugehörige Testfallkriterium verletzt wird. Aufgrund des besonderen Schutzbedürfnisses von Fahrradfahrern ist es unerlässlich, dass diese mit einem Abstand von 1,5 m überholt werden. Neben dem Verhalten in einem einzelnen VHR wurde überprüft, ob das Egofahrzeug in der Lage ist, in longitudinaler Richtung in einen anderen VHR einzufahren. Insbesondere ging es hierbei darum, zu analysieren, wie das Egofahrzeug auf unterschiedliche Geschwindigkeitsbegrenzungen reagiert. Hierbei zeigt sich, dass die Verhaltens- und Trajektorienplanung bereits verzögert, bevor ein anderer VHR betreten wird und somit die Geschwindigkeitsanforderungen berücksichtigt. Allerdings beschleunigt das Egofahrzeug im umgekehrten Fall zu früh auf die höhere Geschwindigkeitsbegrenzung des zweiten VHR. Dadurch wird in diesem Testfall eine Fehlplanung der Verhaltens- und Trajektorienplanung identifiziert. Insgesamt zeigt sich, dass die Verhaltens- und Trajektorienplanung bereits erste grundlegende Funktionalitäten besitzt, sich jedoch noch in der Entwicklungsphase befindet. Daher dienen die Testfälle zur Orientierung für die Weiterentwicklung. Insbesondere bei dem Verhalten des Egofahrzeugs bei Überholmanövern ist wichtig, die Fehlerquelle zu isolieren, da im Rahmen der Arbeit keine Fehlerlokation möglich war.

7 Diskussion der Ergebnisse und Ausblick

In einem ersten Schritt dieser Arbeit wurde der aktuelle Stand der Technik im Bereich der Szenario- und Testfallgenerierung analysiert. Zudem wurden Begrifflichkeiten festgelegt und der Zusammenhang zwischen Szenarien und Testfällen aufgedeckt. Der aktuelle Stand der Technik zeigte, dass es nicht möglich ist, isoliert Testfälle zu generieren, ohne ein Testkonzept zu entwickeln. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit ein gesamthaftes Testkonzept für die Verhaltens- und Trajektorienplanung aufgebaut. Das vierstufige Verfahren von Schuldt et al. repräsentiert solch ein gesamthaftes Testkonzept, das als Anhaltspunkt verwendet wurde. Dieses Verfahren beginnt mit einer Analyse des Testobjekts und geht dann dazu über, Testfälle zu generieren. Anschließend werden die Testfälle durchgeführt und ausgewertet.¹¹⁸

Um zum Abschluss der Arbeit das eigene Konzept zu evaluieren, wurden vor der Methodikentwicklung Anforderungen an das Testkonzept gestellt. Dabei war es besonders wichtig, dass ein Testkonzept entwickelt wird, das eine effiziente und effektive Überprüfung der Verhaltens- und Trajektorienplanung sicherstellt. Effizient bedeutet, dass möglichst wenig Testfälle für eine vollständige Validierung notwendig sind. Jeder Testfall erzeugt einen Informationsgewinn über den Funktionserfüllungsgrad des Testobjekts. Für eine effektive Überprüfung ist es notwendig, dass die Testfallgenerierung eine vollständige Überprüfung sicherstellt. Anhand dieser Gesichtspunkte findet in diesem Kapitel eine Diskussion der erstellten Methodik statt.

Wie erwähnt besteht nach Schuldt et al. der erste Schritt in einem vollständigen Testkonzept darin, dass das Testobjekt analysiert wird. Daher wurden die Aufgaben der Verhaltens- und Trajektorienplanung definiert und klar von den Aufgaben anderer Module abgegrenzt. Dieses Verständnis zu erlangen war wichtig, um darauf aufbauend Anforderungen abzuleiten. Diese Anforderungen wurden durch BSSD Attribute repräsentiert. Allerdings wurden weitere, von BSSD unabhängige Anforderungen abgeleitet, die speziell für die Trajektorienplanung relevant sind. Diese Anforderungen wurden auch genutzt, um Testfallkriterien abzuleiten, die zur späteren Bewertung des Moduls nach der Durchführung von Testfällen dienen. Bei gewissen Anforderungen war unklar, bis auf welche Ebene die Verhaltensplanung Entscheidungen trifft und ab welchem Detailgrad Entscheidungen von der Trajektorienplanung getroffen werden. Beispielsweise ist noch nicht definiert worden, welches der beiden Module für ein frühzeitiges Abbremsen vor einem Fußgängerüberweg verantwortlich ist. Hier wäre es essenziell für die Zukunft eine genauere Aufgabentrennung der beiden Module vorzunehmen, da eine endgültige Bewertung des Funktionsgrads auch notwendigerweise separat vorgenommen wird.

Im Anschluss an die Testobjektanalyse folgte die Entwicklung einer Methodik zur Generierung von Szenarien und Szenarien. Dabei werden initial funktionale Szenarien auf Basis von BSSD gebildet, die dann in einem Übersetzungsprozess in konkrete Szenarien gewandelt werden. Zuerst wird an dieser Stelle auf den Prozess zur Erstellung der Szenarien eingegangen. Die Erstellung von Szenarien

¹¹⁸ Schuldt, F. et al.: Effiziente systematische Testgenerierung für Fahrerassistenzsysteme in virtuellen Umgebungen (2013).

durch das Hinzufügen von Verkehrsteilnehmern erfolgt jedoch ebenso zuerst auf einer abstrakten Ebene und wird im Anschluss konkretisiert.

Funktionale Szenerien beinhalten eine Beschreibung der Szenerie durch die Semantik, die im BSSD Konzept genutzt wird. Dabei wurden verschiedene Grundtopologien von VHR festgelegt, die jeweils in der Lage sind, unterschiedliche Verhaltensanforderungen zu kontrollieren. Nach dem Aufbau einer Topologie von VHR werden die Verhaltensanforderungen der einzelnen Räume bestimmt. Durch die anschließende Variation der Systemeingänge in die Verhaltens- und Trajektorienplanung wird berücksichtigt, dass Verdeckungen beziehungsweise eingeschränkte Sichtwinkel eine signifikante Rolle im urbanen Straßenverkehr spielen. Diese Variation der Systemeingänge zielt darauf ab, das Verhalten des Egofahrzeugs in Situationen, die mit Unsicherheit behaftet sind, zu kontrollieren. Die Übersetzung einer funktionalen Szenerie in eine konkrete Szenerie beinhaltet eine Festlegung des Parameterraums. In dieser Arbeit wurde der Parameterraum dadurch bestimmt, dass der mögliche geometrische Aufbau sich an den Vorgaben der RASt orientiert. Zudem wurde einzelnen Ausprägungen von BSSD Attributen Verkehrsschilder, Fahrbahnmarkierungen und Wechsellichtzeichen zugeordnet.

Die Nutzung von BSSD erbrachte verschiedene Vorteile. Durch BSSD wird eindeutig definiert, welche Verhaltensanforderungen aus einer Szenerie entstehen. Das ermöglicht, dass unterschiedliche Szenerien mit denselben Verhaltensanforderungen zusammengefasst werden. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass Verhaltensanforderungen in Topologien überprüft werden, die eine limitierte Anzahl an VHR besitzen. So ist es möglich, bereits in einem einzelnen VHR eine Vielzahl an Verhaltensanforderungen zu überprüfen. Es ist nicht notwendig, umfangreiche Szenerien aufzubauen, da sämtliche Verhaltensanforderungen bereits in den limitierten Topologien dargestellt werden. Somit wird der Parameterraum und damit die Anzahl an Testfällen signifikant reduziert. Durch die entwickelte Methodik werden abstrakte (funktionale) Szenarien entwickelt, indem nur die Verhaltensanforderungen und topologischen Beziehungen einer Szenerie festgelegt werden, ohne dass dem direkt eine reale Szenerie entgegengestellt wird. Diese reale Szenerie wird erst im Zuge der Übersetzung geschaffen. Es wird jedoch nur ein einziges reales Äquivalent zu dieser funktionalen Szenerie erzeugt beziehungsweise nur die Geometrie innerhalb dieses Äquivalents variiert. Falls Testfälle in diesem realen Äquivalent bestanden werden, wird die Verhaltensanforderung als überprüft und bestanden gewertet. Dies steigert die Effizienz des Verfahrens, da sichergestellt wird, dass Szenerien mit den gleichen Verhaltensanforderungen nicht mehrfach überprüft werden. Es wurden zudem Szenerien des deutschen Straßenverkehrs betrachtet, um zu ermitteln, welche Kombinationen an VHR in der Realität existieren und welche Kombinationen nicht vorkommen und daher für die weitere Betrachtung ausgeschlossen werden. Dadurch verringerte sich die Anzahl an möglichen Szenerien.

Die einzige Form der Parametrisierung der abstrakten Szenerie findet durch eine Parametrisierung der Geometrie statt. Anschließend wird eine Kombination dieser geometrischen Parameter für eine konkrete Szenerie ausgewählt. Bisher wurden konkrete Szenerien basierend auf eigenen Einschätzungen zum Schwierigkeitsgrad abgeleitet. Die Auswahl von Kombinationen wurde jedoch nicht formalisiert, sodass nicht festgelegt wurde, wie viele Testfälle für ein einzelnes funktionales Szenario letztendlich generiert werden. Durch die Schaffung eines Parameterraums wurde eine Grundlage für

weitere Arbeiten geschaffen. Für eine vollständig formalisierte Testfallgenerierung in der Zukunft ist es notwendig, einen Prozess zur Auswahl von Parametern zu schaffen. Mögliche Ideen wurden während der Literaturrecherche vorgestellt, die beispielsweise statistische Überlegungen betreffen.

Die Methodik beinhaltet auch die Positionierung und Trajektorienplanung anderer Verkehrsteilnehmer, um von einer Szenerie zu einem Szenario zu gelangen. Dies ist notwendig, um die Interaktion des Egofahrzeugs mit anderen Verkehrsteilnehmern, beispielsweise in Vorrangsituationen, zu simulieren. Über eine Kombinatorik, die für einzelne Arten von Verkehrsteilnehmern individualisiert ist, werden Teilnehmer im Raum positioniert und ihre Initialgeschwindigkeit sowie ihr Zielort bestimmt. Ein Ablaufkatalog beschreibt die Bewegungen von diesen Verkehrsteilnehmern zuerst auf einer abstrakten Ebene innerhalb des Szenarios. Die Nutzung von Start- und Endbedingungen, die sich an der Position des Egofahrzeugs orientieren, stellt sicher, dass relevante Szenarien entstehen. Durch eine Definition von fahrdynamischen Parametern ergibt sich ein Rahmen, indem die abstrakten Aktionen durchgeführt werden. Aus diesem Parameterraum ist es möglich, eine Vielzahl an konkreten Szenarien aus einem abstrakten Szenario zu erzeugen. Die daraus entstehenden Szenarien orientieren sich an der Überprüfung von verschiedenen relativen Fahrmanövern, die in Anhang E dargestellt sind. Diese dienen dazu, die einzelnen Szenarien, die in einer Szenerie durch das Verhalten von dynamischen Elementen entstehen, zu gruppieren. Innerhalb dieser Gruppierungen ist es möglich, Aussagen über die Kritikalität einzelner Parameterkombinationen zu treffen, wodurch perspektivisch eine Reduzierung der notwendigen konkreten Szenarien angestrebt wird. Es wurde noch nicht abschließend geklärt, inwiefern verschiedene Fahrmanöver innerhalb verschiedener Szenerien überprüft werden. Diese Arbeit bildet somit eine Grundlage zur Generierung und Gruppierung von Szenarien mit dynamischen Elementen, ist jedoch nicht in der Lage eine vollständige Überprüfung nachzuweisen. Ein weiterer Faktor besteht darin, dass die bisher entwickelte Methodik das regelkonforme Verhalten von Verkehrsteilnehmern darstellt. Um die Resilienz der Verhaltens- und Trajektorienplanung zu überprüfen, wäre eine Modellierung des irregulären Verhaltens von Verkehrsteilnehmern erforderlich.

Im Rahmen der Implementierung wurden erste Testfälle in einer Simulationsumgebung aufgebaut und durchgeführt. Hierfür war es zunächst notwendig, ein Verständnis über den Aufbau der Simulation zu erlangen. Da, wie erwähnt, die Verhaltens- und Trajektorienplanung noch nicht vollständig entwickelt ist, wurden Testfälle nur für vorhandene Funktionalitäten erzeugt und durchgeführt. Auf Basis dieser Testfälle war es möglich, eine erste Bewertung der Verhaltens- und Trajektorienplanung durchzuführen. Ein Faktor, der die Effizienz der Testfallerzeugung limitiert, ist der Aufwand, der mit einer Erstellung von Karten in zwei verschiedenen Formaten einhergeht. So war es notwendig, Dateien im Road 5-Format sowie im Lanelet2-Format zu erstellen. Hier wäre eine Reduzierung auf ein Kartenformat möglich, indem eine automatisierte Konvertierung in das andere Format entwickelt wird. Hierfür wäre es allerdings zuvor notwendig, eine Aufwandsabschätzung zu erstellen, um sicherzugehen, dass eine automatisierte Konvertierung tatsächlich in einem Effizienzvorteil resultiert.

Das Fahrzeug ist dazu in der Lage, in einzelnen VHR Geschwindigkeitsbegrenzungen zu berücksichtigen und einzuhalten. Die Einhaltung lateraler Grenzen funktionierte sowohl bei Geraden sowie auch in engen Kurven mit einer Kurvenkrümmung von $\frac{1}{9} \frac{1}{m}$. Allerdings war es durch die Testfälle auch möglich, gewisse Defizite des Moduls aufzudecken. So beschleunigte das Fahrzeug zu früh auf

höhere Geschwindigkeiten in Antizipation einer höheren Geschwindigkeitsbegrenzung in folgenden VHR und verletzte damit die Begrenzungen im aktuellen VHR. Die Interaktion mit dynamischen Elementen funktionierte teilweise, sodass ein Folgen von anderen Verkehrsteilnehmern bei ausreichendem Abstand (im Vergleich mit gesetzlichen Vorgaben) vollständig umgesetzt wurde, es aber bei höheren Geschwindigkeiten ($50 \frac{km}{h}$) zu Kollisionen bei einem plötzlichen Abbremsen des vorderen Verkehrsteilnehmers kam. Es war allerdings nicht möglich, den Fehlerursprung innerhalb der Module direkt zu identifizieren. Es wurde nur deutlich, dass das Fahrzeug zu spät anfängt, zu verzögern. Solch eine Fehlerlokation wäre hilfreich, um schneller Rückschlüsse für die Funktion zu ziehen. Dafür wäre es notwendig, in Kooperation mit den Funktionsentwicklern solch eine Fehlerlokation zu entwickeln.

Zur Auswertung der Testfälle wurden in MATLAB Funktionen zur Bewertung des Geschwindigkeits- und Pfadverlaufs des Egofahrzeugs erzeugt, die für die bisher entwickelten Testfälle funktionieren. Daneben erfolgte eine Analyse von Graphen in dem Programm IPG Control, das Teil von Carmaker ist, um die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern zu kontrollieren. Für eine automatisierte Auswertung komplexerer Testfälle in umfangreicheren Szenarien ist jedoch eine Weiterentwicklung notwendig. Bei dieser Automatisierung wäre es allerdings auch notwendig, begründet zu entscheiden, welche Teile der Auswertung automatisiert werden, um sicherzustellen, dass damit ein tatsächlicher Effizienzvorteil einhergeht.

Die Erstellung von Szenarien auf Grundlage von BSSD hat gezeigt, dass eine Nutzung von BSSD als weitere Informationsgrundlage für die Verhaltens- und Trajektorienplanung einen Vorteil bringen könnte. Ein Vorteil würde darin bestehen, dass die Verhaltensgrenzen und -anforderungen in einem Raum für das Fahrzeug direkt bekannt wären. Durch die Kenntnis über Vorrangregelungen würde die Verhaltens- und Trajektorienplanung daher wissen, in welche Räume es einen Einblick benötigt, um in eine Kreuzung einfahren zu dürfen. BSSD würde, allgemeiner gesprochen, der Verhaltens- und Trajektorienplanung ein Situationsverständnis ermöglichen beziehungsweise erleichtern. Inwiefern solch eine Überlegung umsetzbar und praktikabel ist, könnte daher Gegenstand von weiteren Untersuchungen werden.

Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik zur Testfallgenerierung und das entwickelte Testkonzept schaffen einen Grundbaustein zur effizienten Validation der Verhaltens- und Trajektorienplanung. Der Fokus der Methodikentwicklung lag auf der Generierung von funktionalen Szenarien auf Basis von BSSD. Die Nutzung von BSSD ermöglicht es, Verhaltensanforderungen und nicht Szenarien zu überprüfen, was die Effizienz des Testverfahrens steigert. Durch die Modellierung des Verhaltens von anderen Verkehrsteilnehmern wird die Interaktion mit diesen auch überprüft. Es besteht ein Spezifikationsbedarf bei der Übersetzung funktionaler Szenarien zu Testfällen, da die bisher erzeugten Testfälle in einem Parameterraum stattfinden, der noch nicht durch statistische Methoden oder inhaltliche Überlegungen eingedämmt wurde. Trotzdem ist es gelungen, auf Basis dieser Arbeit eine erste Einschätzung zum Funktionsgrad der Verhaltens- und Trajektorienplanung zu treffen.

A BSSD Szenerieäquivalente

Longitudinale Übergänge

Raum 1	Raum 2	Crossing Type	Szenerie 1	Szenerie 2	Szenerie 3	Szenerie 4
Own-reserved	Own-reserved	Allowed	Geschwindigkeitsänderung	Änderung der lateralen Boundaries	Änderung der Overtake Regeln	Einfache Ausfahrt aus einem Kreisverkehr
Own-reserved	Own-reserved	Conditional	Übergang an einer LSA (Geradeausfahrt, Rechtsabbiegen und Linksabbiegen)	Fahrt in zugangsbegrenzten Bereich	Einfahrt in einen Kreuzungsbereich mit Vorfahrtsrecht	Einfahrt in Bereich mit entgegenkommendem Verkehr (Verengung auf einen Fahrstreifen) mit LSA
Own-reserved	Own-reserved	Prohibited	Keine Szenerie bekannt			
Own-reserved	Own-reserved	Not possible	Absperrung durch Poller oder andere geometrische Abgrenzungen			
Own-reserved	Externally-reserved	Allowed	Rechtsabbiegen unter Beachtung von Fußgängern	Rechtsabbiegen unter Beachtung von Fahrradfahrern	Bypass (Rechtsabbiegen) und Auffahren auf Straße anschließend	Rechtsabbiegen mit Dreiecksinsel und Vorfahrt wählen
Own-reserved	Externally-reserved	Conditional	Einfahrt in Kreuzungsbereich, der fremdreserviert ist (Vorfahrtsstraße) oder Beachtung von Rechts vor Links Regel notwendig an T- oder X-Kreuzung	Einfahrtsbereich in Kreuzungsbereich, der fremdreserviert ist mit Stoppschild Einfahrt in Kreuzungsbereich - Rechtsabbiegen mit grünem Pfeil	Fußgängerüberweg	Fahrradweg
Own-reserved	Externally-reserved	Prohibited	Einfahrt in Bereich für öffentlichen Nahverkehr	Einfahrt in eine Einbahnstraße	Verbotener U-Turn	Verbotenes Abbiegen
Own-reserved	Externally-reserved	Not possible	Absperrung durch Poller oder andere geometrische Abgrenzungen			

Raum 1	Raum 2	Crossing Type	Szenerie 1	Szenerie 2	Szenerie 3	Szenerie 4
Own-reserved	Equally-reserved	Allowed	Einfahrt in Bereich mit entgegenkommendem Verkehr (Verengung auf einen Fahrstreifen)	Ausfahrt aus einem Kreisell mit nur einem Fahrstreifen - Kooperation zwischen Verkehrsteilnehmern notwendig		
Own-reserved	Equally-reserved	Conditional	Durchfahren einer Kreuzung mit Vorfahrtsrecht mit anschließendem geteiltem Bereich mit Zutrittsbeschränkung			
Own-reserved	Equally-reserved	Prohibited	Keine Szenerie bekannt			
Own-reserved	Equally-reserved	Not possible	Keine Szenerie bekannt			
Externally-reserved	Own-reserved	Allowed	Nach Abbiegevorgängen (Rechtsabbiegen und Linksabbiegen) in eigenreservierten Bereich	Auffahrt auf Vorfahrtsstraße	Überqueren eines Bahnübergangs in eigenreservierten Bereich	Nach Überqueren eines Fußgängerüberwegs oder eines Fahrradwegs
Externally-reserved	Own-reserved	Conditional	Fußgängerüberweg / Fahrradweg und dann in zufahrtsbeschränkten Bereich fahren (bspw. für Anlieger)	Von einem Busfahrstreifen kommend und auf eine Kreuzung fahrend		
Externally-reserved	Own-reserved	Prohibited	Keine Szenerie bekannt			
Externally-reserved	Own-reserved	Not possible	Keine Szenerie bekannt			

Raum 1	Raum 2	Crossing Type	Szenerie 1	Szenerie 2	Szenerie 3
Externally-reserved	Externally-reserved	Allowed	Änderung von Geschwindigkeit, Overtake oder lateral Boundaries (während eines Überholvorgangs)	Befahren eines Fahrradstreifens oder eines Busstreifens mit Geschwindigkeitsänderung	Änderung der lateralen Grenzen bei Befahren eines Fahrradstreifens oder eines Busstreifens
Externally-reserved	Externally-reserved	Conditional	Überfahren eines Fußgängerüberwegs mit Stoppschild und anschließender Vorfahrtsstraße	Überfahren eines Fahrradwegs mit Stoppschild und anschließender Vorfahrtsstraße	Überqueren eines Fußgängerüberwegs und anschließendes Linksabbiegen
Externally-reserved	Externally-reserved	Prohibited	Weiterfahrt in einer Einbahnstraße in falscher Richtung	Einfahrt in eine Einbahnstraße nach Überqueren einer Kreuzung	
Externally-reserved	Externally-reserved	Not possible	Keine Szenerie bekannt		
Externally-reserved	Equally-reserved	Allowed	Überqueren eines Fußgängerüberwegs mit anschließendem Fahrtreifen, der für beide Richtungen befahrbar ist	Überholvorgang mit anschließender Fahrbahnverengung	Abbiegevorgang an einer Kreuzung mit nur einem Fahrtreifen für beide Richtungen
Externally-reserved	Equally-reserved	Conditional	Überqueren eines Fußgängerüberwegs mit anschließendem Fahrtreifen, der für beide Richtungen befahrbar ist mit Zugangsbeschränkung		
Externally-reserved	Equally-reserved	Prohibited	Keine Szenerie bekannt		
Externally-reserved	Equally-reserved	Not possible	Keine Szenerie bekannt		

Raum 1	Raum 2	Crossing Type	Szenerie 1	Szenerie 2	Szenerie 3
Equally-reserved	Own-reserved	Allowed	Herausfahren aus einem Fahrstreifen in zwei Fahrstreifen dann wieder für beide Richtungen		
Equally-reserved	Own-reserved	Conditional	Aus einem geteilten Bereich Hineinfahren in eine Kreuzung mit Vorfahrtsrecht		
Equally-reserved	Own-reserved	Prohibited	Keine Szenerie bekannt		
Equally-reserved	Own-reserved	Not possible	Keine Szenerie bekannt		
Equally-reserved	Equally-reserved	Allowed	Geschwindigkeitsänderung	Änderung von Overtake Regeln in diesem Bereich (Unklar, ob Overtake nicht kategorisch ausgeschlossen ist)	Änderung der lateralen Grenzen (Parkmöglichkeiten, die dann nicht mehr vorhanden sind oder umgekehrt)
Equally-reserved	Equally-reserved	Conditional	Keine Szenerie bekannt		
Equally-reserved	Equally-reserved	Prohibited	Keine Szenerie bekannt		
Equally-reserved	Equally-reserved	Not possible	Keine Szenerie bekannt		
Equally-reserved	Externally-reserved	Allowed	Rechtsabbiegen unter Beachtung von Fußgängern (Fußgängerüberweg) aus geteiltem Bereich heraus		
Equally-reserved	Externally-reserved	Conditional	Hineinfahren in eine Kreuzung ohne Vorfahrtsrecht	Hineinfahren in eine Kreuzung mit Stop-Schild	Überqueren eines Fußgängerüberwegs während einer Verengung
Equally-reserved	Externally-reserved	Prohibited	Keine Szenerie bekannt		
Equally-reserved	Externally-reserved	Not possible	Keine Szenerie bekannt		

Laterale Übergänge

Raum 1	Raum 2	Crossing Type	Szenerie 1	Szenerie 2	Szenerie 3	Szenerie 4
Own-reserved	Own-reserved	Allowed	Fahrstreifenwechsel auf einer Kreuzung oder in einem Kreisverkehr	Fahrstreifenwechsel auf einem mehrstreifigen Streckenabschnitt	Fahrstreifenwechsel bei einer Fahrstreifenverengung (2 auf 1)	
Own-reserved	Own-reserved	Conditional	Lateraler Wechsel auf einen Fahrstreifen mit Bedingungen - Carpool Lane	Parkvorgang, hier ist die Bedingung, dass die Parkabsicht besteht. Falls dies der Fall ist, darf ein lateraler Wechsel in den Parkbereich stattfinden	Lateraler Wechsel auf einen Fahrstreifen mit Bedingungen - Gewichtsbeschränkung	
Own-reserved	Own-reserved	Prohibited	Fahrstreifenwechselverbot in Baustellen	Fahrstreifenwechselverbot kurz vor Kreuzungen		
Own-reserved	Own-reserved	Not possible	Physische Trennung von zwei Fahrstreifen, beispielsweise durch Pylonen			
Own-reserved	Externally-reserved	Allowed	Lateraler Wechsel auf einen geschützten Fahrradstreifen	Lateraler Wechsel auf einen Streifen für den öffentliche Nahverkehr	Überholmanöver - Wechsel auf Streifen für die entgegengesetzte Richtung	
Own-reserved	Externally-reserved	Conditional	Keine Szenerie bekannt			
Own-reserved	Externally-reserved	Prohibited	Geschützter Fahrradstreifen, der nicht befahren werden darf	Eigens für den öffentlichen Nahverkehr reservierten Bereich, der auch sonst nicht befahren werden darf	Fahrbahnbegrenzung mit Fußgängerbereich neben der Fahrbahn, der nicht befahren werden darf (niedriger)	Überholverbot mit Wechsel auf Fahrstreifen für die entgegengesetzte Richtung
Own-reserved	Externally-reserved	Not possible	Physische Trennung von zwei Fahrstreifen - Durch Pylonen - Durch Betontrennwände	Hoher Bordstein als physische Barriere und zum Schutz von Fußgängern		

Raum 1	Raum 2	Crossing Type	Szenerie 1	Szenerie 2	Szenerie 4
Own-reserved	Equally-reserved	Allowed	Nicht in Deutschland: Nutzung eines mittleren Abbiegestreifens für beide Richtungen möglich	Fahrstreifen, der geteilt wird mit Straßenbahn/Bus und daneben Fahrstreifen nur für motorisierte Fahrzeuge	
Own-reserved	Equally-reserved	Conditional	Nicht in Deutschland: Nutzung eines mittleren Abbiegestreifens für beide Richtungen möglich, zusätzlich mit Verknüpfung einer Bedingung		
Own-reserved	Equally-reserved	Prohibited	Keine Szenerie bekannt		
Own-reserved	Equally-reserved	Not possible	Keine Szenerie bekannt		
Externally-reserved	Own-reserved	Allowed	Wechsel von einem Fahrradstreifen auf einen eigenreservierten Fahrstreifen	Wechsel von einem Fahrstreifen für den öffentlichen Nahverkehr auf einen eigenreservierten Fahrstreifen	Wechsel von einem Streifen für den entgegenkommenden Verkehr zu einem Streifen für den Verkehr in die eigene Richtung (Ende des Überholmanövers)
Externally-reserved	Own-reserved	Conditional	Parkvorgang, hier ist die Bedingung, dass die Parkabsicht besteht. Falls dies der Fall ist, darf ein lateraler Wechsel in den Parkbereich stattfinden	Parken in die entgegengesetzte Richtung. Dieser Bereich ist für parkende Fahrzeuge in die entgegengesetzte Richtung reserviert. Gleichzeitig Bedingung, da der Bereich nur bei Parkabsicht befahren werden darf	
Externally-reserved	Own-reserved	Prohibited	Wechsel von einem Streifen für den öffentlichen Nahverkehr auf einen eigenreservierten Streifen	Wechsel von einem getrennten Radweg auf einen eigenreservierten Fahrstreifen	Wechsel von einem Streifen für den entgegenkommenden Verkehr zu einem Streifen für den Verkehr in die eigene Richtung (Ende des Überholmanövers). Dabei endet das Manöver zu spät im Bereich des Überholverbots
Externally-reserved	Own-reserved	Not possible	Durch physische Begrenzungen ist ein Fahrstreifenwechsel nicht möglich von ÖPNV Streifen zu eigenreserviertem Streifen		

Raum 1	Raum 2	Crossing Type	Szenerie 1	Szenerie 2
Externally-reserved	Externally-reserved	Allowed	Überqueren eines Geschützer Fahrradstreifens zu einem Fahrstreifen für öffentlichen Nahverkehr	
Externally-reserved	Externally-reserved	Conditional	Keine Szenerie bekannt	
Externally-reserved	Externally-reserved	Prohibited	Überqueren eines geschützten Fahrradstreifens zu einem Fahrstreifen für öffentlichen Nahverkehr	Befahren eines geschützten Fahrradstreifens und Abgrenzung zu Fußgängerbereich durch niedrigen Bordstein
Externally-reserved	Externally-reserved	Not possible	Befahren eines geschützten Fahrradstreifens und Abgrenzung zu Fußgängerbereich (Fahrbahnrand durch Bordstein)	Wechsel von Bereich für ÖPNV (Busse und Trams) zu Straße für MotorizedVehicles)
Externally-reserved	Equally-reserved	Allowed	Befahren eines geschützten Fahrradstreifens und Rückkehr auf den für beide Richtungen reservierten Weg	Befahren eines Streifens für den ÖPNV und Rückkehr auf den für beide Richtungen reservierten Weg
Externally-reserved	Equally-reserved	Conditional	Keine Szenerie bekannt	
Externally-reserved	Equally-reserved	Prohibited	Befahren eines geschützten Fahrradstreifens mit einem Fahrstreifen für MotorizedVehicles für beide Richtungen	
Externally-reserved	Equally-reserved	Not possible	Befahren eines geschützten Fahrradstreifens mit einem Fahrstreifen für MotorizedVehicles für beide Richtungen	
Equally-reserved	Own-reserved	Allowed	Nicht in Deutschland: Rückkehr von der Nutzung eines mittleren Abbiegestreifens für beide Richtungen möglich	Fahrstreifen, der geteilt wird mit Straßenbahn/Bus und daneben Fahrstreifen nur für motorisierte Fahrzeuge
Equally-reserved	Own-reserved	Conditional	Nicht in Deutschland: Rückkehr von der Nutzung eines mittleren Abbiegestreifens für beide Richtungen möglich, zusätzlich mit Verknüpfung einer Bedingung	Parkvorgang, hier ist die Bedingung, dass die Parkabsicht besteht. Falls dies der Fall ist, darf ein lateraler Wechsel in den Parkbereich stattfinden
Equally-reserved	Own-reserved	Prohibited	Keine Szenerie bekannt	
Equally-reserved	Own-reserved	Not possible	Keine Szenerie bekannt	

Raum 1	Raum 2	Crossing Type	Szenerie 1	Szenerie 2
Equally-reserved	Equally-reserved	Allowed	Keine Szenerie bekannt	
Equally-reserved	Equally-reserved	Conditional	Keine Szenerie bekannt	
Equally-reserved	Equally-reserved	Prohibited	Keine Szenerie bekannt	
Equally-reserved	Equally-reserved	Not possible	Keine Szenerie bekannt	
Equally-reserved	Externally-reserved	Allowed	Befahren eines geschützten Fahrradstreifens von einem Streifen für beide Richtungen aus kommend	
Equally-reserved	Externally-reserved	Conditional	Parken in die entgegengesetzte Richtung. Dieser Bereich ist für parkende Fahrzeuge in die entgegengesetzte Richtung reserviert. Gleichzeitig Bedingung, da der Bereich nur bei Parkabsicht befahren werden darf	
Equally-reserved	Externally-reserved	Prohibited	Befahren eines geschützten Fahrradstreifens von einem Streifen für beide Richtungen aus kommend, dabei war das Betreten des Fahrradstreifens eigentlich verboten	Bereich für Fußgänger neben der Fahrbahn. Die Fahrbahn besteht dabei nur aus einem Fahrradstreifen, der für beide Richtungen genutzt wird
Equally-reserved	Externally-reserved	Not possible	Geschützter Fahrradstreifen neben dem Fahrstreifen, der für beide Richtungen genutzt wird. Der Fahrradstreifen ist physisch getrennt	Fußgängerbereich neben dem Fahrstreifen, der für beide Richtungen genutzt wird. Der geschützte Fahrradstreifen ist physisch getrennt

C Zustände von ausgewählten Verkehrsteilnehmern

Zustände von schienengebundenen Fahrzeugen

Initialer Zustand	Initiale Fähigkeiten
<ul style="list-style-type: none">▪ Position<ul style="list-style-type: none">○ VHR○ Position innerhalb des VHR▪ Geschwindigkeit▪ Ziel▪ Kommunikation<ul style="list-style-type: none">○ Analog○ Digital	<ul style="list-style-type: none">▪ Fahrdynamik<ul style="list-style-type: none">○ Max. Geschwindigkeit○ Max. Beschleunigung○ Max. Verzögerung

Zustände von Fahrradfahrern

Initialer Zustand	Initiale Fähigkeiten
<ul style="list-style-type: none">▪ Position<ul style="list-style-type: none">○ VHR○ Position innerhalb des VHR (inkl. möglichem lateralen Versatz)▪ Geschwindigkeit▪ Ziel	<ul style="list-style-type: none">▪ Fahrdynamik<ul style="list-style-type: none">○ Max. Geschwindigkeit○ Max. Beschleunigung○ Max. Verzögerung

D Anforderungen und dazugehörige Testfallkriterien

Fahrstreifen halten, Fahrstreifen wechseln und auf dynamische Objekte reagieren

	Anforderung	BSSD Verhalten	Mögliches Testkriterium	Konkrete Umsetzung der Kriterien
1	Keep lane / Follow route	Dieses Verhalten betrifft die Einhaltung lateraler Grenzen. Diese müssen beim Befahren eines Fahrstreifens eingehalten werden	Abweichung von der Mitte des Fahrstreifens Distanz zur linken u. rechten Begrenzung des Fahrstreifens	Betrag der Abweichung und Einführung einer Minimierungsfunktion. Ab einem bestimmten Wert Test nicht bestanden, da dann laterale Grenzen nicht eingehalten wurden
2	Lange Change	Lateraler Wechsel des Verhaltensraums	Erkennt das Fahrzeug, ob ein Fahrstreifenwechsel zulässig ist	Einfache binäre Abfrage, die durch Überqueren einer bestimmten Grenze abgefragt werden kann
2.1	Überprüfen der Zulässigkeit	Ist ein Fahrstreifenwechsel an bestimmte Bedingungen geknüpft --> CrossingType Falls ja: Erfüllt das Fahrzeug notwendige Bedingungen? Wird ein Fahrzeug mit gleichem Reservierungsrecht auf dem Zielfahrstreifen behindert?		
2.2	Regelung des Wechsels	Erfolgt ein Wechsel ohne die lateralen Grenzen des Zielfahrstreifens zu verletzen? - Nicht-Übertreten der äußeren Grenze - Nicht-Übertreten der inneren Grenze nachdem diese überfahren wurde - Nicht-Zurückschwenken auf vorherigen Fahrstreifen --> Fahrstreifenwechsel gelingt fehlerfrei	Wird die äußere Grenze des Zielfahrstreifens verletzt? Wird die innere Grenze nach vollständigem Übertreten verletzt? Erfolgt der Fahrstreifenwechsel harmonisch?	Binäre Abfrage, die durch Überqueren der äußeren Grenze abgefragt werden kann Binäre Abfrage, die durch Überqueren der inneren Grenze abgefragt werden kann Dauer des Fahrstreifenwechsels, Bahn des Fahrstreifenwechsels bewerten über Varianzen
	React to dynamic objects	Was für ein Reservierungsrecht besitzt das dynamische Objekt	-	Maximierungsfunktion mit Sättigung ab einem bestimmten Zeitpunkt. Zudem Testfall nicht bestanden bei Unterschreiten eines kritischen Abstands
	Vorfahrt gewähren	Bei Reservierungsrecht eines anderen Verkehrsteilnehmers darf dieses nicht in seiner Trajektorie behindert werden	Abstand zu anderen Verkehrsteilnehmern	
	Kollisionen verhindern	Vermeiden von Kollisionen auf eigenem Fahrstreifen unabhängig vom Reservierungsrecht	-	

Unterpunkte Kollisionen verhindern, Abstand halten u. Überholen mit Fahrstreifenwechsel

	Anforderung	BSSD Verhalten	Mögliches Testkriterium	Konkrete Umsetzung der Kriterien
3.2.1	Abbremsen	Verbleiben auf dem eigenen Fahrstreifen und Abstand halten zu vorausfahrendem Verkehrsteilnehmer	Längsbeschleunigung Abstand zum vorderen Verkehrsteilnehmer	Minimierungsfunktion, da zu große Beschleunigungen zu vermindertem Komfort führen. Ab einem bestimmten Wert ist das Abbremsen zudem aufgrund von fahrdynamischen Grenzen nicht mehr umsetzbar Maximierungsfunktion mit Sättigung ab einem bestimmten Zeitpunkt. Zudem binäres Kriterium bei Unterschreiten eines bestimmten kritischen Abstands
3.2.1.1	Umsetzung des Bremsmanövers	Rechtzeitiges Abbremsen durch konservative Trajektorienplanung		
3.2.1.2	Umsetzung des Notbremsmanövers	Planen einer umsetzbaren Bremsung		
3.2.2	Ausweichen	Verbleiben innerhalb des eigenen Fahrstreifens oder Ausweichen auf anderen Fahrstreifen unter Berücksichtigung anderer Verkehrsteilnehmer	Querbeschleunigung Abstand zum vorderen Verkehrsteilnehmer	
3.2.2.1	Umsetzung des Ausweichmanövers	Rechtzeitiges Ausweichen und Planen einer umsetzbaren Trajektorie, die im Rahmen der Grenzen der Fahrdynamik liegt	Abstand zu anderen Verkehrsteilnehmern	
3.3	Abstand halten	Einhalten eines Mindestabstands zu anderen Verkehrsteilnehmern (lateral oder longitudinal)		Maximierungsfunktion mit Sättigung ab einem bestimmten Zeitpunkt. Zudem binäres Kriterium bei Unterschreiten eines bestimmten kritischen Abstands
4	Overtake mit Fahrstreifenwechsel	Fahrstreifenwechsel zum Überholen eines anderen Verkehrsteilnehmers	-	-
4.1	Erkennen, ob Overtake erlaubt ist	Wie sehen die lateralen Grenzen des Verhaltensraums aus?	-	Berücksichtigung der lateralen VHR Grenzen --> Vorgaben dürfen nicht verletzt werden
4.2	Durchführen eines Overtake-Manövers	Bei der Trajektorie des Überholmanövers dürfen keine anderen Verkehrsteilnehmer im fremdreservierten Bereich behindert werden. Auch Fahrzeuge, die kein Reservierungsrecht besitzen, dürfen nicht durch den Fahrstreifenwechsel in ihrer Fahrt behindert werden	Abstand zum überholten Verkehrsteilnehmer Abstand zur äußeren lateralen Grenze des anderen Fahrstreifens Abstand zu entgegenkommenden Verkehrsteilnehmern	Kombination von bereits erwähnten Kriterien sowie einer Evaluation des Abstands zwischen Ego-Fahrzeug und Verkehrsteilnehmer auf dem Nachbarstreifen

Reagieren auf LSA u. auf Verkehrszeichen reagieren (1/2)

	Anforderung	BSSD Verhalten	Mögliches Testkriterium	Konkrete Umsetzung der Kriterien
5	React to traffic lights	Longitudinaler Verhaltensraumwechsel mit CrossingType conditional aufgrund eines traffic lights	Längsbeschleunigung Abstand zu longitudinaler Begrenzung	Überqueren der longitudinalen Grenze des Verhaltensraums bei grünem Licht der LSA Anhalten und Nicht-Überqueren der LSA bei rotem Licht
5.1	Abbremsen und Anhalten	Kein Übertreten der longitudinalen Grenze bei Rotlicht	-	Längsverzögerung hin zum Anhalten muss innerhalb definierter Grenzen sein
5.2	Anfahren	Überfahren der longitudinalen Grenze bei Erfüllen der Übertrittsbedingung	-	Längsbeschleunigung bei grünem Licht nach Anhalten muss innerhalb definierter Grenzen sein
6	React to traffic signs / rules	Beachten versch. Verkehrsschilder, die Verhaltensregeln implizieren, die durch BSSD abgedeckt sind	-	-
6.1	Stop-Schild	Bedingung für das Überqueren einer longitudinalen Verhaltensraumgrenze	Abstand zu longitudinaler Begrenzung	Geschwindigkeit an einer longitudinalen Begrenzung muss 0 km/h erreichen bevor in den folgenden VHR eingetreten werden darf
6.2	Vorfahrt gewähren Schild	Fremdreservierung des nächsten VHR in long. Richtung	Trajektorie des eigenen Fahrzeugs und Trajektorie anderer Verkehrsteilnehmer	Interaktion mit anderen dynamischen Elementen --> Abstandsmessungen plus Überprüfung der verschiedenen Bahnen bzw. Trajektorien (Zeitbindung, da VT mit Reservierungsrecht zuerst einen Weg befahren darf)
6.3	Vorfahrtsschild	Eigenreservierung des nächsten VHR in long. Richtung	Trajektorie des eigenen Fahrzeugs und Trajektorie anderer Verkehrsteilnehmer	Interaktion mit anderen dynamischen Elementen --> Abstandsmessungen plus Überprüfung der verschiedenen Bahnen bzw. Trajektorien
6.4	Grüner Pfeil	Reservierungsrecht sowie CrossingType in longitudinaler Richtung spiegeln dies wieder	Berücksichtigung des Reservierungsrechts - Abstand zu anderen Verkehrsteilnehmern	Berücksichtigung des CrossingTypes sowie des Reservierungsrechts. Daher Testfallkriterien wie bei Vorfahrt gewähren
6.5	Rechts-vor-Links (Deutschland)	Reservierung, die Vorfahrt innerhalb eines Fahstreifens bestimmt	-	-

Auf Verkehrszeichen reagieren (2/2) und Vorrangregelungen beachten

	Anforderung	BSSD Verhalten	Mögliches Testkriterium	Konkrete Umsetzung der Kriterien
6.6	Geschwindigkeitsbegrenzung	Speed Attribut innerhalb von BSSD. Bei VHR Übergang muss Geschwindigkeitsbegrenzung in beiden VHR eingehalten werden --> Niedrigere Geschwindigkeit annehmen, falls Geschwindigkeitsdifferenz vorhanden	Delta zu erlaubter Geschwindigkeit	Asymmetrische Funktion zur Bewertung des Geschwindigkeitsdeltas, wobei alles mit einer Abweichung von mehr als x km/h zu höherer Qualitätverlusten führt (schlechterer Bewertung) - theoretisch kann eine zu hohe Geschwindigkeit auch als K.O. Kriterium festgelegt werden
6.7	Überholverbot	Laterale Verhaltensraumgrenze bestimmt, ob Überholen erlaubt ist	Abstand zu lateraler Grenze Abstand zu vorausfahrendem Verkehrsteilnehmer	Abstand zu lateralen Grenzen des Verhaltensraums sowie Abstand zum vorderen Verkehrsteilnehmer
6.8	Überholverbot innerhalb des eigenen Fahrstreifens	Overtake Attribut innerhalb von BSSD	Abstand zu lateraler Grenze Abstand zu vorausfahrendem Verkehrsteilnehmer	Überprüfen, ob bei Vorhandensein eines Verkehrsteilnehmers auf demselben Fahrstreifen, versucht wird diesen zu überholen (Betrachtung der Entwicklung des long. Abstands)
6.9	Beachtung von Eintrittsbedingungen in bestimmte Streckenabschnitte	CrossingType Conditional mit ConditionType UserCondition oder TimeCondition	Überqueren einer longitudinalen Grenze, falls dies erlaubt ist	Überprüfen, ob zugangsbeschränkte Bereiche auch bei Nicht-Erfüllung befahren werden
7	Right of way rules	Reservierung, die Vorfahrt innerhalb eines Fahrstreifens bestimmt	Abstand zu anderen Verkehrsteilnehmer Fahrdynamische Kriterien wie Längsbeschleunigung und Querbeschleunigung	Interaktion mit anderen dynamischen Elementen --> Abstandsmessungen plus Überprüfung der verschiedenen Bahnen bzw. Trajektorien (Zeitbindung, da VT mit Reservierungsrecht zuerst einen Weg befahren darf
7.1	Rechts-vor-Links / Vorfahrtsschild	Siehe oben		
7.3	Stop-Schild	Bedingung für das Überqueren einer longitudinalen Verhaltensraumgrenze --> Resultiert in Deutschland mit einer Fremdreservierung des VHR in long. Richtung	Überprüfen, ob Bedingung eingehalten wird zur longitudinalen Überquerung einer Grenze	Geschwindigkeit an einer longitudinalen Begrenzung muss 0 km/h erreichen bevor in den folgenden VHR eingetreten werden darf

Fahstreifenverringierungen und Befahren von Fußgängerüberwegen

	Anforderung	BSSD Verhalten	Mögliches Testkriterium	Konkrete Umsetzung der Kriterien
8	Merging two lanes	Spezielle Verhaltensraumgrenzen: Beim Mergen ist vorderere longitudinale Grenze nicht vorhanden. Lateraler Wechsel ist dann notwendig	-	Abstand zu Verkehrsteilnehmer auf lateral angrenzendem Fahstreifen Binäre Abfrage, die durch Überqueren der äußeren Grenze abgefragt werden kann Dauer des Fahstreifenwechsels und Bahn des Fahstreifenwechsels
8.1	Fahstreifenwechsel	Lateraler Wechsel des Verhaltensraums Berücksichtigung anderer Fahrzeuge beim Fahstreifenwechsel auf dem angrenzenden Fahstreifen	Kriterien wie bei regulärem Fahstreifenwechsel	
8.2	Trajektorienplanung mit ausreichender zeitlicher Toleranz	Nicht Überqueren der äußeren lateralen Grenze	Abstand zu äußerer lateraler Grenze des Verhaltensraums	
8.3	Geschwindigkeitsanpassung	Nicht Überqueren der äußeren lateralen Grenze und sicherer lateraler Wechsel	Fahrzeuggeschwindigkeit während des Fahstreifenwechsels Querbeschleunigung Längsbeschleunigung	
9	Pass zebra crossing	Verhaltenraum mit Reservierungsrecht für Fußgänger	Längsbeschleunigung Abstand zu Fußgänger	Qualitative Analyse der Trajektorien der Fußgänger und des Egofahrzeugs Geschwindigkeitsanalyse des Egofahrzeugs: Festlegen einer Geschwindigkeit mit dem das Egofahrzeug sich an den Fußgängerüberweg annähern darf Bedingung no_stagnant_traffic: Freihalten des Fußgängerüberwegs --> Beim Befahren des Fußgängerüberwegs Geschwindigkeit größer Schrittgeschwindigkeit bspw. Alles andere wird dann als blockiert bewertet
9.1	Abbremsvorgang	Fußgänger Reservierungsrecht gewähren und Abstand halten Fehlt bzw. nicht durch BSSD klarifiziert: Trajektorie, die dem Fußgänger signalisiert,		
9.2	Anfahrvorgang	Durchfahren des Verhaltensraums, falls Reservierungsrecht nicht von der Reservierungsklasse ausgeübt wird		
9.3	Freihalten des Fußgängerüberwegs	CrossingType Conditional und no_stagnant_traffic		

Überholen von Verkehrsteilnehmer im eigenen Fahrstreifen

	Anforderung	BSSD Verhalten	Mögliches Testkriterium	Konkrete Umsetzung der Kriterien
10	Pass other vehicles in <u>own lane</u>	Overtake Attribut in BSSD deckt dieses Verhalten ab	Abstand in lateraler und longitudinaler Richtung zu anderen Verkehrsteilnehmern Geschwindigkeitsdifferenz zu anderen Verkehrsteilnehmern	Überprüfung, ob laterale Grenze überquert werden durfte Abstand in lateraler und longitudinaler Richtung zu anderen Verkehrsteilnehmern Dauer des Überholvorgangs und Geschwindigkeitsdelta währenddessen
10.1	Überholen nur, wenn dies erlaubt ist	Overtake Attribut als Boolescher Operator		
10.2	Abstand zu anderen Verkehrsteilnehmer einhalten	Abstand halten, um Kollisionen zu vermeiden sowie möglichst kein Überqueren von lateralen Grenzen des Verhaltensraums. Wenn dies doch notwendig ist, ist zu beachten, dass keine Teilnehmer mit dem gleichen Reservierungsrecht auf dem angrenzenden Fahrstreifen behindert werden		
10.3	Durchführung des Überholvorgangs			
10.3.1	Minimierung der zeitlichen Dauer während der Verkehrsteilnehmer geringen lateralen Abstand haben gegenüber Beschränkung des Geschwindigkeitsunterschieds zwischen Verkehrsteilnehmern	Unklar, da es hierfür keine genaue Spezifikation in BSSD gibt Vermeidung von Kollisionen bspw. - allerdings wird in BSSD nicht festgelegt, wie sich genau gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern verhalten werden soll. Es werden nur die Grenzen des erlaubten Verhaltens dargestellt		

E Relative Fahrmanöver

Manöver	Erklärung
Folgen	Es befinden sich beide Verkehrsteilnehmer auf demselben Fahrstreifen, während sich der Abstand nicht verändert, da sie den Fahrstreifen mit derselben Geschwindigkeit befahren.
Annähern	Das Manöver setzt voraus, dass sich beide Verkehrsteilnehmer auf demselben Fahrstreifen befinden. Dabei verringert sich aufgrund der Relativgeschwindigkeit der Abstand des hinteren Verkehrsteilnehmers auf den vorderen Verkehrsteilnehmer.
Einscheren	Das Manöver bezeichnet eine Veränderung des lateralen Abstands. Während sich am Anfang eines Manövers ein Verkehrsteilnehmer seitlich versetzt auf einem anderen Fahrstreifen befindet, ist dieser in longitudinaler Richtung vor dem anderen Verkehrsteilnehmer. Durch das Einscheren wechselt der seitlich versetzte Verkehrsteilnehmer den Fahrstreifen und befindet sich nun vor dem anderen Verkehrsteilnehmer auf dessen Fahrstreifen
Überholen	Dieses Manöver wurde bereits in Kapitel 4.2 erläutert. Es besteht aus einem Folgemanöver, anschließend einem Fahrstreifenwechsel, einem Passieren und zuletzt einem Einscheren.
Passieren	Zwei Verkehrsteilnehmer befinden sich auf verschiedenen Fahrstreifen in die gleiche Richtung, die lateral angrenzend sind. Ein Verkehrsteilnehmer ist in longitudinaler Richtung hinter dem anderen Verkehrsteilnehmer und fährt mit einer höheren Geschwindigkeit an dem anderen Verkehrsteilnehmer daher vorbei.
Kreuzen	Zwei Verkehrsteilnehmer bewegen sich aus unterschiedlichen Richtungen auf den gleichen Raum zu. Dadurch ist es für einen der beiden Verkehrsteilnehmer notwendig, seine Trajektorie anzupassen, um eine Kollision zu vermeiden.

F Funktionale Szenarien

VHR Nummerierung: erste Ziffer: Segment, zweite Ziffer: VHR im Segment, dritte Ziffer: Richtung

Befahren eines einstreifigen Abschnitts mit Überqueren eines Fußgängerüberwegs				
Dimension		Ausprägung		
Anzahl an Verhaltensräumen in long. Richtung bzw. Anzahl an Segmenten		3		
Anzahl an Verhaltensräumen in lat. Richtung für Segment 1		1		
Anzahl an Verhaltensräumen in lat. Richtung für Segment 2		1		
Anzahl an Verhaltensräumen in lat. Richtung für Segment 3		1		
Inputvariation, um Umweltbedingungen zu repräsentieren		-		
Vorhandene andere Akteure und deren Anzahl		Ein Fußgänger (<i>Pedestrian</i>)		
Beschreibung der Attribute einzelner VHR				
BSSD Verhaltensraum 1-1-1 (genauso wie 3-1-1)				
<i>Behavior</i>	<i>Reservation</i>	<i>Longitudinal Boundary</i>	<i>Lateral Boundary Left</i>	<i>Lateral Boundary Right</i>
<i>Speed = 50 km/h</i>	<i>ReservationType: Own-Reserved</i>	<i>CrossingType: Allowed</i>	<i>CrossingType: Prohibited</i>	<i>CrossingType: Prohibited</i>
<i>Overtake = Yes</i>	<i>ReservationClass: MotorizedVehicles</i>	<i>ConditionType: -</i>	<i>ConditionType: -</i>	<i>ConditionType: -</i>
	<i>ReservationLinks: -</i>			
BSSD Verhaltensraum 2-1-1				
<i>Behavior</i>	<i>Reservation</i>	<i>Longitudinal Boundary</i>	<i>Lateral Boundary Left</i>	<i>Lateral Boundary Right</i>
<i>Speed = X km/h</i>	<i>ReservationType: Externally-Reserved</i>	<i>CrossingType: Conditional</i>	<i>CrossingType: Prohibited</i>	<i>CrossingType: Prohibited</i>
<i>Overtake = Yes</i>	<i>ReservationClass: Pedestrians</i>	<i>ConditionType: no_stagnant_traffic</i>	<i>ConditionType: -</i>	<i>ConditionType: -</i>



	<i>ReservationLinks:</i>						
	- RL 1						
Reservation Link 1 (RL 1)							
Quelle		Durchfahrt		Senke			
Non-Regular Motion Space oder Lane		Lane		Non-Regular Motion Space oder Lane			
Akteur		Position		Ziel		Aktuelle Geschwindigkeit	
Egofahrzeug		1-1		Ende von 3-1		50 km/h	
MotorizedVehicle 1		1-1 vor dem Ego-Fahrzeug		Ende von 3-1		Gleiche Geschwindigkeit	
Pedestrian 1		RL 1 – Quelle		RL 1 – Senke		Stehend	
Ablaufsequenz	Akteur	Aktion oder Event		Startbedingung		Endbedingung	
1	Pedestrian	Gehen von RL 1- Quelle nach auf RL 1 – Senke		TTE Kriterium		Erreichen der Senke	

G Konkrete Szenarien

Umsetzung des funktionalen Szenarios in ein konkretes Szenario

	VHR 1-1-1	VHR 2-1-1	VHR 3-1-1
Krümmung	Keine	Keine	Keine
Topologie	0 % Steigung	0 % Steigung	0 % Steigung
Länge	100 m	4 m	70 m
Breite	3,5 m	3,5 m	3,5 m
Reale Elemente			
Verkehrsschilder	Fußgänger – links u. rechts Tempo 50	Keine	
Verkehrsinfrastruktur	Keine	Keine	
Fahrbahnmarkierungen Fahrbahnabgrenzungen	Rand links und rechts durchgezogene Linien oder alternativ Bordsteine re. und li.	Fahrbahnmarkierung für Fußgängerüberwege Rand links und rechts durchgezogene Linien oder alternativ abgeflachter Bordstein re. und li	Rand links und rechts durchgezogene Linien oder alternativ Bordsteine re. und li.
Parametrisierung der Anfangsszene			
Akteur	Position	Ziel	Aktuelle Geschwindigkeit
Egofahrzeug	0 m innerhalb des ersten VHR	Ende des Fahrstreifens bei 174 m	50 km/h
MotorizedVehicle 1	1.5 m bis 200 m vor dem Fahrzeug	Ende des Fahrstreifens bei 174 m	50 km/h
Pedestrian 1	0 m vor Eintritt in den Durchgang	Ende der Senke	0 km/h
Ablaufkatalog			
Ablaufsequenz	Akteur	Aktion oder Event	Startbedingung
1	Pedestrian	Gehen von RL 1-Quelle nach auf RL 1 – Senke mit 3km/h	TTE=3 s

H Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen¹²⁰

Unterteilung der Fahrstreifenbreite an einer Kreuzung mit Fahrstreifenerweiterung

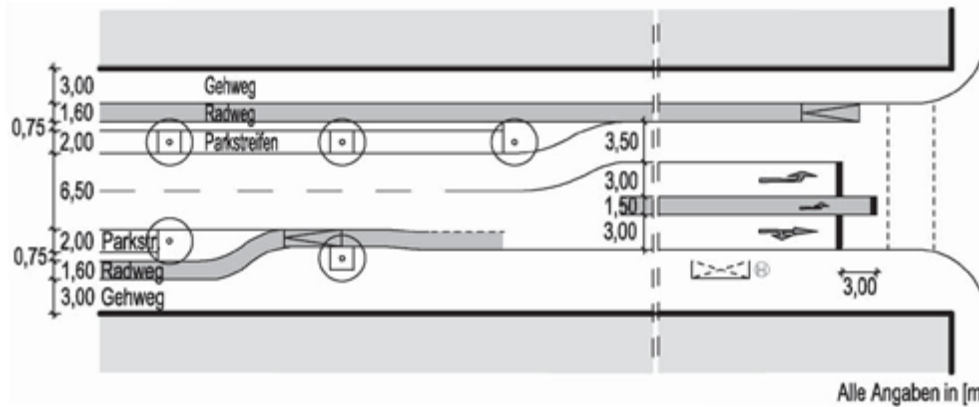


Abbildung Anhang H - 1: Fahrstreifenbreite an einer Kreuzung mit Fahrstreifenerweiterung¹²⁰

Unterteilung der Fahrstreifenbreite bei der Einfahrt in einen Kreisverkehr

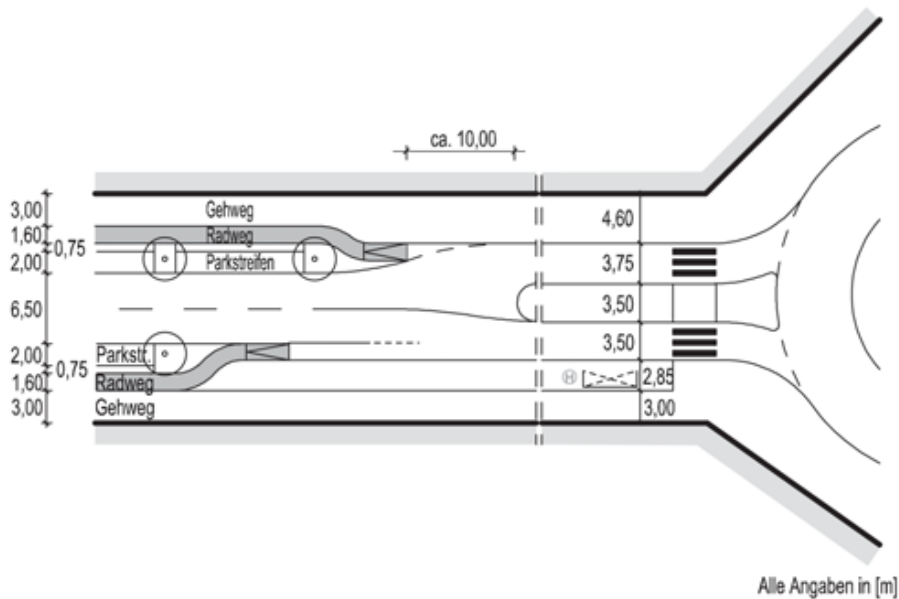


Abbildung Anhang H - 2: Fahrstreifenbreite bei der Einfahrt in einen Kreisverkehr¹²⁰

Kurvenradien

An Kreisverkehren wird zwischen dem Kurvenradius innerhalb des Kreisverkehrs und dem Radius bei der Ausfahrt aus dem Kreisverkehr unterschieden. Die Kurvenradien innerhalb des Kreisverkehrs werden indirekt über Vorgaben zum Kreiseldurchmesser bestimmt. Die Minimal- und Maximalwerte

¹²⁰ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (2012).

dafür sind in Tabelle H-1 dargestellt. Dazwischen können beliebige Diskretisierungsstufen gewählt wird. Nach den Richtlinien des BASt erscheint es ausreichend, Diskretisierungsstufen von einem Meter zu wählen.

Tabelle Anhang H - 1: Ausgestaltung von Kurven¹²¹

Entwurfselemente			Grenzwerte	
			V _{zul} = 50 km/h	V _{zul} = 70 km/h
Lageplan	Kurvenmindestradius	min R [m]	80	190
	Klothoidenmindestparameter	min A [m]	50	90
	Kurvenmindestradius bei Anlage der Querneigung zur Kurvenaußenseite	min R [m]	250	700
Höhenplan	Höchstlängsneigung	max s [%]	8,0 (12,0)	6,0 (8,0)
	Mindestlängsneigung in Verwindungsstrecken	min s [%]	0,7; s - Δ s ≥ 0,0...0,2 % (ohne Hochbord) 0,5; s - Δ s ≥ 0,5 % (mit Hochbord)	
	Kuppenmindesthalbmesser	min H _k [m]	900	2200
	Wannenmindesthalbmesser	min H _w [m]	500	1200
Querschnitt	Mindestquerneigung	min q [%]	2,5	
	Höchstquerneigung in Kurven	max q _K [%]	6,0 (7,0)	
	Anrampungshöchstneigung	max Δ s [%]	0,50 · a 2,0 (a ≥ 4,0m)	0,40 · a 1,6 (a ≥ 4,0m)
	Anrampungsmindestneigung	min Δ s [%]	0,10 · a a [m] = Abstand des Fahrbahnrandes von der Drehachse	
	Sicht	Mindesthaltesichtweite für s = 0 %	min S _n [m]	43

Tabelle Anhang H - 2: Ausgestaltung von geschwindigkeitsdämpfenden Elementen¹²¹

Werte	Art des Kreisverkehrs	
	Minikreisverkehr	Kleiner Kreisverkehr
Minimalwert für Radius innerhalb des Kreisverkehrs	13 m	26 m
Maximalwert für Radius innerhalb des Kreisverkehrs	22 m	40 m
Minimalwert für Radius der Kreisverkehrausfahrt	8 m	10 m
Maximalwert für Radius der Kreisverkehrausfahrt	10 m	16 m

Des Weiteren wird die Kurve durch den Kurvenwinkel und die Kurvenlänge ausdefiniert. Diese Parameter sind frei wählbar. Die Kombination aus einem kleinen Radius mit großem Kurvenwinkel und großer Kurvenlänge ist besonders herausfordernd. Diese Kombination aus großem Kurvenwinkel und kleinem Kurvenradius ist beispielsweise bei Kreisverkehren oft vorhanden.

¹²¹ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (2012).

Steigungen

Neben dem Verlauf in x- und y-Richtung ist der Höhenverlauf eines Szenarios zu bestimmen. Dabei geht es insbesondere darum, maximale Steigungen festzulegen. Eine Modellierung des Höhenverlaufs ist auch für die Trajektorienplanung relevant, da in bestimmten Konstellationen ein ungünstiger Höhenverlauf zu eingeschränkten Sichtweiten führen kann. Prinzipiell existieren Verkehrsschilder mit einem Gefälle beziehungsweise einer Steigung von 25%. Daher kann dies als erster Anhaltspunkt für die Gestaltung des Höhenverlaufs genommen werden. Diese Schilder sind jedoch allgemein gehalten, was bedeutet, dass eine Differenzierung zwischen Höhenverläufen innerorts und außerorts notwendig ist. Da das Projekt *UNICARagil* sich auf den urbanen Verkehr konzentriert, wird an dieser Stelle nur dieser Teil als relevant erachtet. In den Richtlinien zur Anlage von Stadtstraßen wird bei einer Geschwindigkeitsbegrenzung von $50 \frac{km}{h}$ eine maximale Steigung zwischen 8 % und 12 % festgelegt. Bei $70 \frac{km}{h}$ liegt die maximale Steigung dagegen zwischen 6 % und 8 %. Generell gelten 12 % als Maximum bei der Neugestaltung von Straßen laut den Richtlinien des BAST.

Fahrbahnbeschaffenheit

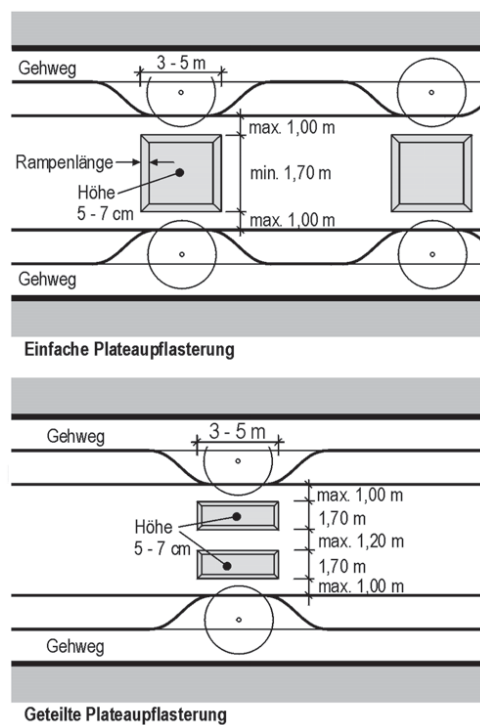


Abbildung Anhang H - 3: Ausgestaltung von geschwindigkeitsdämpfenden Elementen¹²²

Diese verschiedenen Plateaupflasterungen können je nach Konstruktion bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten eingesetzt werden. Bei höheren Geschwindigkeiten ist insbesondere wichtig, dass Plateaus für den Fahrer beziehungsweise für das automatisierte Fahrzeug sichtbar sind. Dies kann durch eine Anpassung der Rampenlänge sichergestellt werden.

¹²² Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (2012).

I Darstellung des Verlaufs eines Testfalls in Matlab

Verlauf des Egofahrzeugs in rot bei einem Test zur Überprüfung des Einhaltens von lateralen Grenzen



Abbildung Anhang F – 1: Route des Egofahrzeugs (rot) mit Fahrstreifenbegrenzungen (grün)

Verlauf des Egofahrzeugs bei einer Folgefahrt. Das Vorderfahrzeug ist mit einer Geschwindigkeit von $10 \frac{m}{s}$ gefahren. Es stellt sich ein Abstand von 39 m ein.

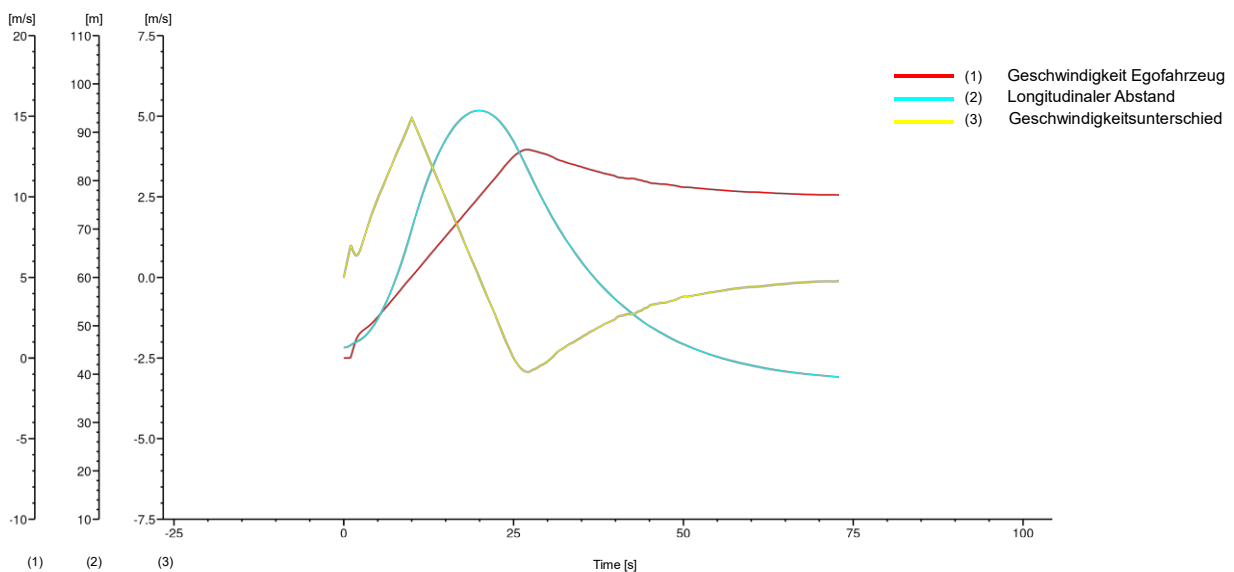


Abbildung Anhang F – 2: Darstellung von Daten während eines Folgemanövers

J Abgeschlossene Testfälle und Abstand zu anderen Verkehrsteilnehmern

Abbildung Anhang – J: Abgeschlossene Testfälle

Testfall	Testfallziel	Lanelet Abfolge	Testfallergebnis
1	Einhalten lateraler Grenzen: Einfache Geradeausfahrt	10000360 10000359	Bestanden
2	Einhalten lateraler Grenzen: Fahrt mit Krümmung	10000045 10000043	Bestanden
3	Einhalten lateraler Grenzen: Fahrt mit mehreren Kurven (10000045 10000043 10000127 10000046	Bestanden
4	Geschwindigkeitsbegrenzungen überprüfen (zwischen 5 und $50 \frac{km}{h}$)	10000360 10000359	Bestanden
5	Geschwindigkeitswechsel (von schnell zu langsam)	10000360 10000359	Bestanden
6	Geschwindigkeitswechsel (von langsam zu schnell)	10000360 10000359	Nicht bestanden
7	Folgen eines motorisierten Fahrzeugs	10000045 10000043	Bestanden
8	Folgen eines Fahrradfahrers	10000127 10000046 10000360 10000359	Bestanden
9	Verzögerungsmanöver mit Vorderfahrzeug	10000045 10000043 10000127 10000046	Bestanden bei bis zu $43 \frac{km}{h}$ Relativgeschwindigkeit
9	Überholen eines motorisierten Fahrzeugs auf dem eigenen Fahrstreifen	10000045 10000043 10000127 10000046	Nicht bestanden
10	Überholen eines motorisierten Fahrzeugs auf dem eigenen Fahrstreifen	10000045 10000043 10000127 10000046	Nicht bestanden

Literaturverzeichnis

Amersbach, C.; Winner, H.: Funktionale Dekomposition im Rahmen des automatisierten Fahrens (2018)

Amersbach, Christian; Winner, Hermann: Funktionale Dekomposition-Ein Beitrag zur Überwindung der Parameterraumexplosion bei der Validation von höher automatisiertem Fahren, 2018

ASAM e.V.: ASAM OpenSCENARIO: Version 2.0.0 Concepts (2020)

ASAM e.V.: ASAM OpenSCENARIO: Version 2.0.0 Concepts, 2020

Bagschik, G. et al.: Szenarien für Entwicklung, Absicherung und Test von automatisierten Fahrzeugen (2017)

Bagschik, Gerrit; Menzel, Till; Reschka, Andreas; Maurer, Markus: Szenarien für Entwicklung, Absicherung und Test von automatisierten Fahrzeugen, in: , 2017

Bagschik, G. et al.: Ontology based Scene Creation for the Development of Automated Vehicles (2018)

Bagschik, Gerrit; Menzel, Till; Maurer, Markus: Ontology based Scene Creation for the Development of Automated Vehicles, in: 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2018

Bock, F. et al.: Textual Domain-Specific Languages for Scenario-Driven Development (2019)

Bock, Florian; Sippl, Christoph; Heinz, Aaron; Lauer, Christoph; German, Reinhard: Advantageous Usage of Textual Domain-Specific Languages for Scenario-Driven Development of Automated Driving Functions, in: undefined, 2019

Bock, J. et al.: Data basis for scenario-based validation of HAD on highways (2018)

Bock, J.; Krajewski, R.; Eckstein, L.; Klimke, J.; Sauerbier, J.; Zlocki, Adrian: Data basis for scenario-based validation of HAD on highways, 2018

Buchholz, M. et al.: Automation of the UNICARagil vehicles (2020)

Buchholz, Michael; Gies, Fabian; Danzer, Andreas; Henning, Matti; Hermann, Charlotte; Herzog, Manuel; Horn, Markus; Schön, Markus; Rexin, Nils; Dietmayer, Klaus; Fernandez, Carlos; Janosovits, Johannes; Kamran, Danial; Kinzig, Christian; Lauer, Martin; Molinos, Eduardo; Stiller, Christoph; Ackermann, Stefan; Homolla, Tobias; Winner, Hermann; Gottschalg, Grischa; Leinen, Stefan; Becker, Matthias; Feiler, Johannes; Hoffmann, Simon; Diermeyer, Frank; Lampe, Bastian; Beemelmans, Till; van Kempen, Raphael; Woopen, Timo; Eckstein, Lutz; Voget, Nicolai; Moormann, Dieter; Jatzkowski, Inga; Stolte, Torben; Maurer, Markus; Graf, Jürgen; Hinüber, Edgar L. von; Siepenkötter, Norbert: Automation of the UNICARagil vehicles, in: 29th Aachen Colloquium Sustainable Mobility, Jahrgang 2, S. 1531–1560, 2020

Buchholz, M.: Modulares Fahrzeugkonzept im Projekt UNICARagil (2020)

Buchholz, Michael: Modulares Fahrzeugkonzept im Projekt UNICARagil, Ulm/Stuttgart, 2020

Buckl, C. et al.: Informations-und Kommunikationstechnologie im Fahrzeug der Zukunft (2011)

Buckl, C.; Fehling, M.; Klein, C.; Schätz, B.: Mehr Software (im) Wagen - Informations- und Kommunikationstechnologie als Motor der Elektromobilität der Zukunft, 2011

Bundesministerium für Justiz: Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung - BOStrab

Bundesministerium für Justiz Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung - BOStrab

Bundesministerium für Justiz: Straßenverkehrsordnung

Bundesministerium für Justiz Straßenverkehrsordnung

C. Sippl et al.: Scenario-Based Systems Engineering for AD Functions (2019)

C. Sippl; F. Bock; C. Lauer; A. Heinz; T. Neumayer; R. German: Scenario-Based Systems Engineering: An Approach Towards Automated Driving Function Development, in: 2019 IEEE International Systems Conference (SysCon), 2019

Cvijetic, N.; Tomazin, T.: Entwicklung einer zentralisierten Rechnerarchitektur für autonome Fahrzeuge (2021)

Cvijetic, Neda; Tomazin, Tom: Entwicklung einer zentralisierten Rechnerarchitektur für autonome Fahrzeuge, in: ATZelektronik 1-2, Jahrgang 16, S. 18–23, 2021

Dietsche, K.-H.; Reif, K.: Kraftfahrtechnisches Taschenbuch (2018)

Dietsche, Karl-Heinz; Reif, Konrad (Hrsg.) Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, Studium und Praxis, 29. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, Heidelberg, 2018

Eckert, M.: Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr (1993)

Eckert, Martin: Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr, 1. Auflage, Verl. Technik, Berlin, 1993

Eckstein, L.; Zlocki, A.: Safety Potential of ADAS : Combined Methods for an Effective Evaluation

Eckstein, Lutz; Zlocki, Adrian: Safety Potential of ADAS : Combined Methods for an Effective Evaluation, Lehrstuhl und Institut für Kraftfahrzeuge (ika)

Filippidis, I.: OpenStreetMap Functions (2022)

Filippidis, Ioannis: OpenStreetMap Functions, GitHub, 2022

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (2012)

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen, FGSV, Jahrgang 200, 2006. Auflage, FGSV-Verl., Köln, 2012

Genesereth, M. R.: Logical Foundations of Artificial Intelligence (2012)

Genesereth, Michael R.: Logical Foundations of Artificial Intelligence, Elsevier Science, Burlington, 2012

Geyer, S.: Diss., Manöverbasierte Fahrzeugführung (2013)

Geyer, Sebastian: Entwicklung und Evaluierung eines kooperativen Interaktionskonzepts an Entscheidungspunkten für die teilautomatisierte, manöverbasierte Fahrzeugführung, Dissertation TU Darmstadt, 2013

Glatzki, F. et al.: Behavior-Semantic Scenery Description (BSSD) for the Development of Automated Driving Functions (2021)

Glatzki, Felix; Lippert, Moritz; Winner, Hermann: Behavioral Attributes for a Behavior-Semantic Scenery Description (BSSD) for the Development of Automated Driving Functions, in: , 2021

Go, K.; Carroll, J. M.: The blind men and the elephant: Views of scenario-based system design (2004)

Go, Kentaro; Carroll, John M.: The blind men and the elephant: Views of scenario-based system design, in: interactions (6), Jahrgang 11, S. 44–53, 2004

Hartmann, N.: Automation des Tests eingebetteter Systeme am Beispiel der Kraftfahrzeugelektronik (2001)

Hartmann, Nico: Automation des Tests eingebetteter Systeme am Beispiel der Kraftfahrzeugelektronik, Karlsruhe, 2001

Hildebrand, J.: Entwicklung eines Frameworks zur automatisierten Generierung der BSSD-Erweiterung für lanelet2-Karten (2022)

Hildebrand, Jannik: Entwicklung eines Frameworks zur automatisierten Generierung der BSSD-Erweiterung für lanelet2-Karten
TU Darmstadt, 2022

IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology (1990) IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology, in: IEEE Std 610.12-1990, 1990

Institut für Unfallanalysen: Nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmer

Institut für Unfallanalysen: Nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmer; <https://unfallanalyse.hamburg/index.php/ifu-lexikon/nomotors/>

IPG Carmaker: Road 5 (2022)

IPG Carmaker: Road 5, 2022

ISO: ISO 26262 Road vehicles — Functional safety (2011)

ISO: ISO 26262 Road vehicles — Functional safety, 2011

Jatzkowski, I. et al.: Zum Fahrmanöverbegriff im Kontext automatisierter Straßenfahrzeuge (2021)

Jatzkowski, Inga; Nolte, Marcus; Stolte, Torben; Menzel, Till; Graubohm, Robert; Ernst, Susanne; Steimle, Markus; Salem, Nayel; Richelmann, Jan; Maurer, Markus: Zum Fahrmanöverbegriff im Kontext automatisierter Straßenfahrzeuge, 2021

Jungmayr, S.: Testbarkeitsanforderungen an die Software (2008)

Jungmayr, Stefan: Testbarkeitsanforderungen an die Software, in: undefined, 2008

Junietz, P. et al.: Metrik zur Bewertung der Kritikalität von Verkehrssituationen und -szenarien (2017)

Junietz, Philipp; Schneider, Jan; Winner, Hermann: Metrik zur Bewertung der Kritikalität von Verkehrssituationen und -szenarien, in: , 2017

Keuth, H.: Karl Poppers „Logik der Forschung“ (2019)

Keuth, Herbert: Karl Poppers „Logik der Forschung“, in: Handbuch Karl Popper, Springer VS, Wiesbaden, 2019

Klamann, B. et al.: Defining Pass-/Fail-Criteria for Particular Tests of Automated Driving Functions (2019)

Klamann, Björn; Lippert, Moritz; Amersbach, Christian; Winner, Hermann: Defining Pass-/Fail-Criteria for Particular Tests of Automated Driving Functions, in: 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), 2019

Kleiner, S.; Kramer, C.: Model Based Design with Systems Engineering Based on RFLP Using V6 (2013)

Kleiner, Sven; Kramer, Christoph: Model Based Design with Systems Engineering Based on RFLP Using V6, in: Abramovici, Michael; Stark, Rainer (Hrsg.): Smart product engineering, Lecture Notes in Production Engineering, Springer, Berlin, Heidelberg, 2013

Klischat, M.; Althoff, M.: Generating Critical Test Scenarios for Automated Vehicles with Evolutionary Algorithms (2019)

Klischat, M.; Althoff, M.: Generating Critical Test Scenarios for Automated Vehicles with Evolutionary Algorithms, in: 2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2019

Kuhn, D. R. et al.: Software fault interactions and implications for software testing (2004)

Kuhn, D. R.; Wallace, D. R.; Gallo, A. M.: Software fault interactions and implications for software testing, in: IEEE Transactions on Software Engineering (6), Jahrgang 30, S. 418–421, 2004

Lange, F.: VRR - Unfallrekonstruktion (2006)

Lange, Frank: VRR - Unfallrekonstruktion, in: (10), S. 377–382, 2006

Lippert, M. et al.: BSSD UML (2022)

Lippert, Moritz; Glatzki, Felix; Krämer, Erick: BSSD UML, 2022

Lippert, M. et al.: Behavior-Semantic Scenery Description (BSSD) of Road Networks for Automated Driving (2022)

Lippert, Moritz; Glatzki, Felix; Winner, Hermann: Behavior-Semantic Scenery Description (BSSD) of Road Networks for Automated Driving, 2022

Martin Glinz: Software Engineering – Eine Einführung (2005)

Martin Glinz: Software Engineering – Eine Einführung, 2005

Mathworks: MATLAB (2021)

Mathworks: MATLAB, 2021

Michael Hülsen et al.: Traffic intersection situation description ontology for advanced driver assistance (2011)

Michael Hülsen; Johann Marius Zöllner; Christian Weiss: Traffic intersection situation description ontology for advanced driver assistance, in: undefined, 2011

Microsoft Bing: BING Maps (2022)

Microsoft Bing: BING Maps; <https://www.bing.com/maps>, 2022

Mietzner, D.: Begriff, Nutzen und Funktionen von Szenarien (2009)

Mietzner, Dana: Begriff, Nutzen und Funktionen von Szenarien, in: Mietzner, Dana (Hrsg.): Strategische Vorausschau und Szenarioanalysen, Gabler Research, Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2009

Ministerium für Verkehr: Leitfaden zur Anlage und Ausstattung von Fußgängerüberwegen (2019)

Ministerium für Verkehr Fußgängerüberwege - Leitfaden zur Anlage und Ausstattung von Fußgängerüberwegen in Baden-Württemberg, Februar 2019

Möller, T. et al.: The future of mobility is at our doorstep (2019)

Möller, Timo; Padhi, Asutosh; Pinner, Dickon; Tschiesner, Andreas: The future of mobility is at our doorstep, in: McKinsey & Company, 2019

PEGASUS et al.: PEGASUS METHOD (2019)

PEGASUS; Mazzega, Jens; Lipinski, Daniel; Eberle, Ulrich; Wachenfeld, Walther: PEGASUS METHOD, 2019

Pfeffer, R.: Absicherung hochautomatisierter Fahrfunktionen durch Nutzung von Realdaten (2020)

Pfeffer, Raphael: Szenariobasierte simulationsgestützte funktionale Absicherung hochautomatisierter Fahrfunktionen durch Nutzung von Realdaten, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2020

Poggenhans, F. et al.: Lanelet2

Poggenhans, Fabian; Pauls, Jan-Hendrik; Janosovits, Johannes; Orf, Stefan; Naumann, Maximilian; Kuhnt, Florian; Mayr, Matthias: Lanelet2, GitHub

Poggenhans, F. et al.: Lanelet2: A high-definition map framework for the future of automated driving (2018)

Poggenhans, Fabian; Pauls, Jan-Hendrik; Janosovits, Johannes; Orf, Stefan; Mayr, Matthias: Lanelet2: A high-definition map framework for the future of automated driving, in: , 2018

Popper, K. R.: The Logic of scientific discovery (2008)

Popper, Karl R.: The Logic of scientific discovery, Routledge classics, 2008. Auflage, Routledge, London, 2008

SAE Technical Paper Series (2020) SAE Technical Paper Series, SAE Technical Paper Series, SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2020

Sauerbier, J. et al.: Definition von Szenarien zur Absicherung automatisierter Fahrfunktionen (2019)

Sauerbier, Jan; Bock, Julian; Weber, Hendrik; Eckstein, Lutz: Definition von Szenarien zur Absicherung automatisierter Fahrfunktionen, in: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift (1), Jahrgang 121, S. 42–45, 2019

Scholz, I. et al.: JOSM (2022)

Scholz, Immanuel; Stöcker, Dirk; Legner, Simon; Volke, Stefan, Petermann, Gerd; Niesiołędzki, Wiktor; Mikhalych, Upliner: JOSM, 2022

Schuldt, F. et al.: Effiziente systematische Testgenerierung für Fahrerassistenzsysteme in virtuellen Umgebungen (2013)

Schuldt, Fabian; Saust, Falko; Lichte, Bernd; Maurer, Markus: Effiziente systematische Testgenerierung für Fahrerassistenzsysteme in virtuellen Umgebungen, in: , 2013

Schuldt, F. et al.: Systematische Auswertung von Testfällen für Fahrfunktionen im modularen virtuellen Testbaukasten (2014)

Schuldt, Fabian; Lichte, Bernd; Maurer, Markus; Scholz, Stephan: Systematische Auswertung von Testfällen für Fahrfunktionen im modularen virtuellen Testbaukasten, in: , 2014

Schuldt, F.: Diss., Methodisches Testen von automatisierten Fahrfunktionen mit Hilfe von virtuellen Umgebungen (2017)

Schuldt, Fabian: Ein Beitrag für den methodischen Test von automatisierten Fahrfunktionen mit Hilfe von virtuellen Umgebungen, Dissertation TU Braunschweig, 2017

Schwall, M. et al.: Waymo Public Road Safety Performance Data

Schwall, Matthew; Daniel, Tom; Victor, Trent; Favaró, Francesca; Hohnhold, Henning: Waymo Public Road Safety Performance Data

Spillner, A.: Basiswissen Softwaretest (2012)

Spillner, Andreas: Basiswissen Softwaretest, ISQL-Reihe, 5. Auflage, dpunkt.verlag, Heidelberg, 2012

Stanford Artificial Intelligence Laboratory et al.: Robot Operating System (ROS) (2018)

Stanford Artificial Intelligence Laboratory et al.: Robot Operating System (ROS), 2018

Steimle, M. et al.: Grundvokabular für den szenarienbasierten Testansatz automatisierter Fahrfunktionen (2018)

Steimle, Markus; Bagschik, Gerrit; Menzel, Till; Wendler, Jan T.; Maurer, Markus: Anwendung eines Grundvokabulars für den szenarienbasierten Testansatz automatisierter Fahrfunktionen anhand eines Beispiels, in: , 2018

Steimle, M. et al.: Ein Beitrag zur Terminologie für den szenarienbasierten Testansatz automatisierter Fahrfunktionen (2018)

Steimle, Markus; Gerrit Bagschik; Till Menzel; Jan Timo Wendler; Markus Maurer: Ein Beitrag zur Terminologie für den szenarienbasierten Testansatz automatisierter Fahrfunktionen, in: , 2018

Taguchi, G. et al.: Taguchi's Quality Engineering Handbook (2007)

Taguchi, Genichi; Chowdhury, Subir; Wu, Yuin (Hrsg.) Taguchi's Quality Engineering Handbook, John Wiley & Sons, Ltd, 2007

Ulbrich, S. et al.: Defining and Substantiating the Terms Scene, Situation, and Scenario for AD (2015)

Ulbrich, Simon; Menzel, Till; Reschka, Andreas; Schuldt, Fabian; Maurer, Markus: Defining and Substantiating the Terms Scene, Situation, and Scenario for Automated Driving, in: 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems, 2015

understand.ai: Extraction of real-world driving data in simulations

understand.ai: Scenario generation - Test and validate your autonomous driving functions with simulatable scenarios taken from the real world.; <https://understand.ai/scenario-generation.html>

UNI DAS e.V.: Effiziente Felderprobung von Fahrerassistenzsystemen

UNI DAS e.V. (Hrsg.) Effiziente Felderprobung von Fahrerassistenzsystemen

UNICARagil: Disruptive modulare Architektur für agile automatisierte Fahrzeugkonzepte (2020)

UNICARagil (Hrsg.) Disruptive modulare Architektur für agile automatisierte Fahrzeugkonzepte, 2020

Weitzel, D. A.: Kontrollierbarkeit nicht situationsgerechter Reaktionen umfeldsensorbasierter Fahrerassistenzsysteme (2013)

Weitzel, Dirk A.: Objektive Bewertung der Kontrollierbarkeit nicht situationsgerechter Reaktionen umfeldsensorbasierter Fahrerassistenzsysteme, FZD Fahrzeugtechnik TU Darmstadt, Jahrgang 774, VDI-Verl., Düsseldorf, 2013

Willke, T. et al.: A survey of inter-vehicle communication protocols and their applications (2009)

Willke, Theodore; Tientrakool, Patcharinee; Maxemchuk, Nicholas: A survey of inter-vehicle communication protocols and their applications, in: IEEE Communications Surveys & Tutorials (2), Jahrgang 11, S. 3–20, 2009

Winner, H.; Wachenfeld, W.: Die Freigabe des autonomen Fahrens

Winner, Hermann; Wachenfeld, Walther: Die Freigabe des autonomen Fahrens, in:

Wirth, G.: Abmessungen von Straßenbahnen

Wirth, Gerhard: Abmessungen von Straßenbahnen; <https://www.nahverkehr-info.de/strassenbahn-abmessung.php>, Zugriff 25.03.2022

Woopen, T. et al.: UNICARagil - Disruptive Modular Architectures for Agile, Automated Vehicle Concepts

Woopen, Timo; Eckstein, Lutz; Lampe, Bastian; Bödekker, Torben: UNICARagil - Disruptive Modular Architectures for Agile, Automated Vehicle Concepts

Wördenweber, B. et al.: Automotive lighting and human vision (2007)

Wördenweber, Burkard; Wallaschek, Jörg; Boyce, Peter; Hoffman, Donald D.: Automotive lighting and human vision, Springer, Berlin, Heidelberg, 2007

Zębala, J. et al.: Pedestrian acceleration and speeds (2012)

Zębala, J.; Cięпка, P.; Reza, A.: Pedestrian acceleration and speeds, Jahrgang 91, 2012

Zeppenfeld, B.: Durchschnittsgeschwindigkeit von Fahrradfahrern in Deutschland (2022)

Zeppenfeld, B.: Erfasste Durchschnittsgeschwindigkeit von Fahrradfahrern in Deutschland nach Bundesländern im Jahr 2018; <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/872531/umfrage/geschwindigkeit-der-fahrradfahrer-in-deutschland-nach-bundeslaendern/>, 2022, Zugriff 26.03.2022

Zhang, X. et al.: Scenario Description Language for Automated Driving Systems: A Two Level Abstraction Approach (2020)

Zhang, X.; Khastgir, S.; Jennings, P.: Scenario Description Language for Automated Driving Systems: A Two Level Abstraction Approach, in: 2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2020