

# **Entwurf und Entwicklung virtuell erweiterter Testfelder**

## **zur Erprobung hochautomatisierten Fahrens im urbanen Umfeld**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften  
(Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Wirtschaftswissenschaften  
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte  
DISSERTATION

von  
M.Sc. Marc René Zofka, geb. Broghammer  
geb. in Tuttlingen

Tag der mündlichen Prüfung: 08.07.2025  
Referent: Prof. Dr.-Ing. J. Marius Zöllner  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Tobias Düser

Karlsruhe 2025





# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter, Projektleiter und schließlich Leiter der Abteilung Technisch-kognitive Systeme (TKS) am FZI Forschungszentrum Informatik in Karlsruhe. Da eine Promotion nicht ohne die Unterstützung zahlreicher Personen gelingt, möchte ich mich bei einigen - stellvertretend für alle - besonders bedanken:

Vor allem möchte ich Herrn Professor Dr.-Ing. J. Marius Zöllner für die Betreuung dieser Arbeit bedanken. Die wissenschaftliche Anleitung, ausführlichen und konstruktiven Diskussionen sowie visionäre Vorstellungen bei gleichzeitigen Freiheiten gaben den notwendigen Freiraum für die Umsetzung der Forschung. Für Anfragen fand er immer ein offenes Ohr. Desweiteren möchte ich Herrn Professor Dr.-Ing. T. Düser für die Übernahme des Korreferates danken. Beiden Prüfenden gebührt mein Dank für das äußerst detaillierte und konstruktive Feedback zu der vorliegenden Arbeit.

Ein großer Dank gilt TKS. Mit diesem Team hatte ich die Gelegenheit an unzähligen Demonstratoren und zu lernen und zu wachsen. Besonderer Dank gilt dabei Sebastian Klemm, Marc Essinger, Ralf Kohlhaas, Florian Kuhnt, Stefan Orf, Sven Ochs, Tobias Fleck, Marc Heinrich und Philip Schörner. Ebenso möchte ich Alexander Viehl und der guten Seele Sonja Göttl für die stets währende Unterstützung danken. Aber auch auf die Unterstützung im Testfeld, insbesondere Michael Frey und Kevin Simon, war jederzeit sprichwörtlich zu bauen. Unerwähnt bleiben soll auch nicht die Kollegschaft der Abteilung IDS, allen voran Arne Rönna und Georg Heppner. Unzählige Studierende haben als wissenschaftliche Hilfskräfte oder im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten unterstützt. Auch ihnen gebührt mein Dank.

Schließlich möchte ich Conny Zofka und Michael Henrichsen für das abschließende Korrekturlesen und die dabei aufgekommenen, stets erdenden Rückfragen danken. Ein großer Dank gilt meinen Eltern Gabriele und Klaus-Peter Broghammer und meinem Bruder Kai, die mich während Studium und Promotion immer unterstützt haben. Schließlich gebührt mein größter Dank meiner Frau Stefanie und meinen Töchtern Vanessa und Valentina, die mit Ruhe, Verzicht und Verständnis jederzeit unterstützt haben. Auch in Phasen größter Anstrengung haben sie mir den nötigen Rückhalt. Ich danke Euch von Herzen.

*Linkenheim-Hochstetten, im September 2025*

*Marc René Zofka*



# Abstract

Automated driving is advancing in more and more areas of application, such as private transport, public transport and logistics. Advanced driver assistance systems that relieve the driver of parts of the driving task, and highly automated driving functions, which are intended to replace the driver entirely, are based on the same operating principle. The development process involves successive testing from the components of a driving function to the system level of the entire vehicle. More and more components are gradually being tested in virtual simulations, on test benches and finally in field trials.

In recent years, concepts for smart infrastructure have emerged in research along with proving grounds and test areas in public traffic. These offer a promising, previously unrealised, approach to develop new test system concepts by means of virtual extension with virtual twins.

This thesis presents such a flexible and scalable test system using smart infrastructure for proving grounds and test fields in order to realize urban test scenarios while at the same time guaranteeing criteria such as observability and controllability. This involves investigating which variations of a static traffic environment, vulnerable road user behaviour and, in particular, the transfer of a virtually extended environment to the driving function can be carried out and how these can be modelled uniformly.

The test system presented is based on a meta-model that enables the instantiation of different test system configurations. For this purpose, augmentation ratios are introduced, which allow a category-specific evaluation of the models used between reality and virtuality. Contributions derived from this include the capability model for proving grounds and test areas, the immersive integration of vulnerable road users, the augmentation of sensor and environmental models along different injection points and the concept of a distributed test system. The empirical evaluation with experimental vehicles in the Test Area Autonomous Driving Baden-Württemberg allows the evaluation of the presented contributions.



# Zusammenfassung

Automatisiertes Fahren durchdringt immer mehr Anwendungsfelder, wie den Individualverkehr, den ÖPNV oder auch die Logistik. Fahrerassistenzsystemen, die einen Fahrer in Teilen der Fahraufgabe entlasten, und hochautomatisierten Fahrfunktionen, die den Fahrer gänzlich ersetzen sollen, liegt dabei dasselbe charakteristische Wirkprinzip zugrunde. Deren bisheriger Entwicklungsprozess sieht eine sukzessive Erprobung von den Komponenten einer Fahrfunktion bis hin zur Systemebene des Gesamtfahrzeugs vor. Dabei werden mehr und mehr Komponenten schrittweise in virtuellen Simulationen, auf Prüfständen und schließlich in der Felderprobung abgesichert.

In den letzten Jahren sind in der Forschung Konzepte für smarte Infrastrukturen für Prüfgelände und Testfelder im öffentlichen Verkehrsraum aufgekommen. Diese bieten einen vielversprechenden, bisher ungehobenen Ansatz, um durch eine virtuelle Erweiterung mit virtuellen Zwillingen neuartige Testsystemkonzepte zu entwerfen.

Die vorliegende Arbeit entwirft ein solches flexibles und skalierbares Testsystem mittels smarter Infrastruktur für Prüfgelände und Testfelder, um urbane Testszenarien bei gleichzeitiger Gewährung von Kriterien wie Beobachtbarkeit und Kontrollierbarkeit zu erzeugen. Dabei wird untersucht, welche Variationen einer statischen Verkehrsszenarie, des Verhaltens vulnerabler Verkehrsteilnehmer und insbesondere der Zuführung einer virtuell erweiterten Umgebung an die Fahrfunktion erfolgen können und wie sich diese einheitlich modellieren lassen.

Das vorgestellte Testsystem gründet dabei auf einem Metamodell, welches die Instantiierung verschiedener Testsystemkonfigurationen ermöglicht. Hierzu werden Augmentierungsgrade vorgestellt, die categoriespezifisch eine Bewertung der verwendeten Modelle zwischen Realität und Virtualität erlauben. Daraus abgeleitete Beiträge umfassen das Fähigkeitenmodell für Prüfgelände und Testfelder, die immersive Einbindung von vulnerablen Verkehrsteilnehmern, die Augmentierung von Sensor- und Umweltmodellen entlang verschiedener Injektionspunkte, sowie das Konzept eines verteilten Testsystems. Die empirische Evaluation mit Versuchsträgern im Testfeld Autonomes Fahren Baden-Württemberg erlaubt die Bewertung der vorgestellten Verfahren.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>Symbol- und Operatorenverzeichnis</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Ausgangssituation und Problemstellung . . . . .	5
1.3 Zielsetzung und Beiträge der Arbeit . . . . .	7
1.4 Struktureller Aufbau der Arbeit . . . . .	9
<b>2 Übersicht über den Stand der Forschung</b>	<b>11</b>
2.1 Das autonome Fahrzeug als komplexer Systemverbund . . . . .	12
2.2 Erweiterung der Systemgrenzen durch Vernetzung . . . . .	15
2.3 Testen, Verifikation und Validierung . . . . .	16
2.4 Open Loop Entwicklungs- und Testmethoden . . . . .	20
2.5 Closed Loop Entwicklungs- und Testmethoden . . . . .	22
2.6 Modellbildung und Simulation . . . . .	37
2.7 Alternative Mixed Reality Ansätze . . . . .	42
2.8 Verbleibender Forschungsbedarf . . . . .	43
<b>3 Anforderungsanalyse aus situativer und technologischer Perspektive</b>	<b>45</b>
3.1 Das urbane Verkehrsumfeld . . . . .	46
3.2 Systemarchitekturen autonomer Fahrzeuge . . . . .	50
3.2.1 Anwendungsfall: Automatisiertes Parksystem für mehrstöckige Parkhäuser . . . . .	50
3.2.2 Anwendungsfall: Erschließung der letzten Meile mit automatisierten Shuttles . . . . .	54
3.2.3 Anwendungsfall: Kooperatives, vernetztes Fahren . . . . .	57
3.2.4 Bildung einer exemplarischen Referenzarchitektur . . . . .	59
3.3 Diskussion und Fazit . . . . .	61
<b>4 Entwicklung virtuell erweiterter Testfelder und Prüfgelände</b>	<b>65</b>
4.1 Modellierung von Testsystemkonfigurationen zur Erzeugung virtuell erweiterter Szenarien . . . . .	66
4.2 Abbildung von Prüfgeländen und Testfeldern in digitalen Zwilling . . . . .	73
4.2.1 Beschreibung der Fähigkeiten im digitalen Zwilling . . . . .	73
4.2.2 Die hochgenaue Karte als Grundlage der Augmentierung . . . . .	78

4.2.3	Referenzmesssysteme zur Bewertung augmentierter Szenarien . . . . .	83
4.3	Abbildung von Verkehrsteilnehmern auf virtuell erweiterte Testfelder . . . . .	90
4.3.1	Skalierung zwischen modellbasierten und datengetriebenen Methoden . . . . .	90
4.3.2	Bildung und Integration datengetriebener Ansätze . . . . .	95
4.4	Analyse, Modellierung und Injektion von Umweltmodellen . . . . .	100
4.4.1	Analyse von Injektionsebenen der HAD-Funktion . . . . .	100
4.4.2	Sensor-, Umwelt- und Fahrzeugmodellierung . . . . .	105
4.4.3	Durchführung mittels Strategien zur Augmentierung . . . . .	111
4.5	Umsetzung eines vernetzten Testsystems . . . . .	114
4.5.1	Überblick über die Gesamtarchitektur . . . . .	114
4.5.2	Software-Konzept der Co-Simulation verteilter Modelle . . . . .	117
4.5.3	Kommunikation zwischen Infrastruktur und Fahrzeug . . . . .	120
4.6	Zusammenfassung . . . . .	124
<b>5</b>	<b>Evaluation</b>	<b>125</b>
5.1	Vorgehen zur Evaluation . . . . .	126
5.2	Das Erprobungsgelände des TAF-BW . . . . .	127
5.3	Augmentierung der statischen Umgebung . . . . .	130
5.3.1	Augmentierung eines Parkhauses . . . . .	130
5.3.2	Augmentierung eines urbanen Wohnquartiers . . . . .	131
5.4	Augmentierung von Verkehrsteilnehmern . . . . .	132
5.5	Exposition und Injektion in automatisierte Fahrfunktionen . . . . .	140
5.5.1	Relative Selbstlokalisierung in Parkhausinnenräumen . . . . .	141
5.5.2	Detektion von Verkehrsteilnehmenden . . . . .	144
5.6	Verteiltes Testsystem . . . . .	150
5.7	Abschließende Betrachtung . . . . .	157
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>161</b>
6.1	Beitrag der Arbeit . . . . .	161
6.2	Fortführende Fragestellungen . . . . .	163
6.3	Schlusswort . . . . .	165
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>167</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>171</b>
	<b>Eigene Veröffentlichungen</b>	<b>173</b>
	<b>Studentische Arbeiten</b>	<b>179</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>181</b>



# Abkürzungsverzeichnis

**ADAS** Advanced Driver Assistance Systems

**ASAM e. V.** Association for Standardization of Automation and Measuring Systems e. V.

**AVP** Automated Valet Parking

**C-V2X** Cellular-V2X

**CAD** Computer-Aided Design

**CAM** Cooperative Awareness Messages

**CAN** Controller Area Network

**CC-NG** Cognitive Car Next Generation

**CNN** Convolutional Neural Network

**CoCar** Cognitive Car

**DENM** Decentralized Environmental Notification Message

**DGPS** Differential Global Positioning System

**DIL** Driver-in-the-loop

**E/E** elektrisch-elektronische Architektur

**ECU** Electronic Control Unit (dt. Steuergerät)

**ETSI ITS-G5** European Telecommunications Standards Institute - Intelligent Transportation Systems G5

**EuroNCAP** European New Car Assessment Programme (Europäisches Neuwagen-Bewertungs-Programm)

**FMU** Functional Mockup Unit

**GAN** Generative Adversarial Network

**GCDC** Grand Cooperative Driving Challenge (2016)

**GNSS/INS** GNSS-Aided Inertial Navigation System

## *Abkürzungsverzeichnis*

**GUM** Guide of Uncertainty in Measurement

**HAD** Highly Automated Driving Function

**HIL** Hardware-in-the-loop

**IDM** Intelligent Driver Model

**ISO** International Organization for Standardization

**Lidar** Light Detection and Ranging

**Llet** Lanelet

**Llet1** Lanelet1

**Llet2** Lanelet2

**LRU** Local Road Unit

**LSA** Lichtsignalanlage

**MAPEM** MAP Extended Message

**Mask R-CNN** Mask Region-based CNN

**MIL** Model-in-the-loop

**MTU** Maximum Transmit Unit

**NeRF** Neural Radiance Fields

**OBU** Onboard Unit

**ODD** Operational Design Domain

**OSI** Open Simulation Interface

**OSM** OpenStreetMap

**Radar** Radio Detection and Ranging

**ROS** Robot Operating System

**RSSI** Received Signal Strength Indicator

**RSU** Roadside Unit

**SAE** Society of Automotive Engineers

**SDF** Simulation Description Format

**SIL** Software-in-the-loop

**SLAM** Simultaneous Localization and Mapping  
**SoS** System of Systems  
**SPATEM** Signal Phase and Timing Extended Message  
**StVO** Straßenverkehrs-Ordnung  
**StVZO** Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung  
**SUMO** Simulation of Urban MObility  
**SuT** System-under-Test  
  
**TAF-BW** Testfeld Autonomes Fahren Baden-Württemberg  
**THW** Time-Headaway  
**ToF** Time-of-Flight  
**TTB** Time-to-Break  
**TTC** Time-to-Collision  
  
**URDF** Unified Robot Description Format  
  
**V2X** Vehicle-to-Everything  
**VAE** Variational Autoencoder  
**VDA e. V.** Verband der Automobilindustrie e. V.  
**VDI e. V.** Verein Deutscher Ingenieure e. V.  
**VEHIL** Vehicle-Hardware-in-the-loop  
**VIL** Vehicle-in-the-loop  
**VR** Virtual Reality  
  
**WGS84** World Geodetic System 1984  
  
**XIL** X-in-the-loop  
  
**YOLOv3** You only look Once (KI-basiertes Detektionsmodell)



# Symbol- und Operatorenverzeichnis

$v$  Skalar (klein, nicht fett, kursiv)

$\mathbf{v}$  Vektoren (klein, fett, nicht kursiv)

$V$  Mengen (groß, nicht fett, kursiv)

$V^j$  geordnete Mengen (groß, nicht fett, kursiv)

$\mathbf{V}$  Matrix- oder Tensorvariable (groß, fett, nicht kursiv)

$\mathbf{x}$  Vektor  $\mathbf{x}$  mit Komponenten  $\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$

$\delta_{jk}$  Kronecker-Delta mit  $\delta_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } j = k \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$

$\delta(A)$  Indikator-Funktion mit  $A = \begin{cases} 1, & A \text{ ist wahr} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$

$\mathcal{P}(X)$  Potenzmenge der Menge  $X$  mit  $\mathcal{P} := \{U | U \subseteq X\}$

$\mathcal{I}$  Mengendarstellung der Schnittstellen einer HAF mit  $\mathcal{I} = \{\mathcal{I}_1, \mathcal{I}_2, \dots, \mathcal{I}_n\}$

$\tilde{\Phi}$  Mengendarstellung des in der HAF aus der Realität abgeleiteten Umgebungsmodells mit  $\tilde{\Phi} = \{\tilde{\phi}_1, \tilde{\phi}_2, \dots, \tilde{\phi}_n\}$

$\Phi$  Mengendarstellung der Grundwahrheit vorliegenden Verkehrsumgebung mit  $\Phi = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n\}$

$\Pi(\mathbf{v}, \mathbf{y}, z)$  Augmentierungsfunktion

$X$  Aus Fahrzeug- oder Infrastruktur-Sensor abgeleitete Objektliste mit  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$

$\zeta, \tau, \gamma, \eta$  Augmentierungsgrade bzgl. Szenerie, Dynamik und Injektionsgrade

$\mathcal{A}, \mathcal{B}, \mathcal{T}$  Verkehrsszenario

$\mathbb{S}_i, \mathbb{U}_i, \mathbb{V}_i, \mathbb{I}_i$  Modellinstanzen

$\mathbb{S}, \mathbb{U}, \mathbb{V}, \mathbb{I}$  Metamodell und Modellcontainer



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Am 28. Juli 2021 trat in Deutschland das Gesetz zum autonomen Fahren [10] und nachfolgend am 24. Juni 2022 die entsprechende Verordnung [11] in Kraft. Damit wurde ein wesentlicher Grundstein für die Erprobung automatisierter Mobilitäts- und Transportkonzepte im öffentlichen Raum gelegt. Diese Art der Mobilität verspricht eine sichere und effizientere Art der Fortbewegung im Individualverkehr, im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) und im Waren- und Gütertransport. So werden insbesondere Anwendungen für automatisierte Individualfahrzeuge, automatisierte und elektrische Kleinbusse zur Erschließung der letzten Meile, siehe Abbildung 1.1, wie auch fahrerlose Transportsysteme zur Automatisierung des Warentransports auf Werksgeländen und Betriebshöfen adressiert.

Von einer weitreichenden Automatisierung der Mobilität und des Transportwesens verspricht man sich zahlreiche Vorteile: So sollen nach der Strategie „Vision Zero“ der Europäischen Kommission die Anzahl der Verkehrstoten durch menschliches Versagen im Straßenverkehr bis zum Jahr 2025 auf Null reduziert werden [12]. Des Weiteren sollen die durch den Straßenverkehr erzeugten CO<sub>2</sub>-Emissionen durch einen effizienteren Verkehrsfluss wesentlich verringert, der Platzbedarf zur Unterbringung von Fahrzeugen im innerstädtischen Bereich verringert, wie auch eine Einbindung der älteren Gesellschaft in die Mobilität gewährleistet werden [13].



(a) Automatisierter Individualverkehr mittels PKW.



(b) Automatisierte Kleinbusse zur Erschließung der letzten Meile im ÖPNV. Bildquelle: [Zofka et al., 2022] © 2022 IEEE.

Abbildung 1.1: Beispielhafte Anwendungen des hochautomatisierten Fahrens.

## 1 Einleitung

Dabei wird je nach Grad der Automatisierung zwischen Fahrerassistenzsystemen (FAS), im Englischen Advanced Driver Assistance Systems (ADAS), die beispielsweise in Form eines Spurhalteassistenten den Fahrer nur in eingeschränkten Aspekten der Fahraufgabe entlasten, und hochautomatisierten Fahrfunktionen (HAF), im Englischen Highly Automated Driving Function (HAD), die den Fahrer weitgehend ersetzen, unterschieden. Der stufenweise Übergang zwischen diesen wird durch die Taxonomie des VDA e. V., siehe Abbildung 1.2, skizziert. Den Fahrerassistenzsystemen und hochautomatisierten Fahrfunktionen liegt dasselbe charakteristische Wirkprinzip zugrunde: Die Umgebung des Systems wird sensorisch wahrgenommen und in eine maschinenlesbare und maschinenprozessierbare Repräsentation überführt. Eine hierauf durchgeführte Interpretation dient als Grundlage für die Entscheidung einer Handlungsunterstützung oder -eingriffs des Fahrzeugs in die vorliegende Verkehrssituation, die sowohl für das Fahrzeug als auch für die umgebenen Verkehrsteilnehmer sicher und risikoarm ausgeführt werden soll.

	Stufe 0 DRIVER ONLY	Stufe 1 ASSISTIERT	Stufe 2 TEIL- AUTOMATISIERT	Stufe 3 HOCH- AUTOMATISIERT	Stufe 4 VOLL- AUTOMATISIERT	Stufe 5 FAHRERLOS
Fahrer	Fahrer führt dauerhaft Längs- und Querführung aus	Fahrer führt dauerhaft Längs- oder Querführung aus.	Fahrer muss das System dauerhaft überwachen.	Fahrer muss das System nicht mehr dauerhaft überwachen. Fahrer muss potenziell in der Lage sein, zu übernehmen.	Kein Fahrer erforderlich im spezifischen Anwendungsfall	Von Start bis Ziel ist kein Fahrer erforderlich
Automatisierung	Kein eingreifen- des Fahrzeug- system aktiv.	System übernimmt die jeweils andere Funktion.	System übernimmt Längs- und Querführung in einem spezifischen Anwendungsfall	System übernimmt Längs- und Querführung in einem spezifischen Anwendungsfall. Es erkennt Systemgrenzen und fordert den Fahrer zur Übernahme mit ausreichender Zeitreserve auf.	System kann im spezifischen Anwendungsfall alle Situationen automatisch bewältigen.	Das System übernimmt die Fahraufgabe vollumfänglich bei allen Straßentypen, Geschwindigkeitsbereichen und Umfeldbedingungen.

Abbildung 1.2: Darstellung der Stufen des automatisierten Fahrens nach VDA e. V.. Eigene Darstellung gestaltet nach [14].

Die Anfänge des assistierten und automatisierten Fahrens reichen bis in die Zwanzigerjahre des 20. Jahrhunderts zurück. Im Jahr 1925 wurde von Francis P. Houdina ein Fahrzeug der Firma Chandler Motor Car Company aus einem nachfolgend fahrenden Fahrzeug mittels Funksignalen und Trennschalter aktuierte Elektromotoren durch die Straßen von New York ferngesteuert, was in Folge als „American Wonder“ betitelt wurde. In den folgenden Jahrzehnten wurden weitere Prototypen demonstriert, beispielsweise auf Induktivschleifen basierende Leitsysteme und automatisiert bewegte General Motors Firebirds in den 1950er Jahren. In den



1980er Jahren wurden erste, auf neuronalen Netzen basierende Regelungsstrategien durch die Carnegie Mellon Universität [15] im durch die amerikanische „Defense Advanced Research Projects Agency“ (DARPA) geförderten Vorhaben „Autonomous Land driven Vehicle“ (ALV) demonstriert. In Deutschland wurde zur selben Zeit der Mercedes-Benz Kleintransporter „Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen“ (VaMoRs) [16] durch die Universität der Bundeswehr München ausgerüstet und damit die Machbarkeit quer- und längseregelter Fahrten erstmalig aufgezeigt.

Schließlich wurde die Entwicklung unbemannter Landfahrzeuge in den frühen 2000er Jahren über mehrere akademische Wettbewerbe von der DARPA, den sogenannten „DARPA Grand Challenges“, vorangetrieben. Während die erste und zweite DARPA Grand Challenge 2004 und 2005 in Wüstenumgebungen stattfanden, wurde die dritte „Urban Driving Challenge“ im Jahre 2007 in einer urbanen Verkehrsumgebung ausgerichtet. In den Jahren 2011 und 2016 wurden weitere internationale Wettbewerbe zur Weiterentwicklung insbesondere des vernetzten und kooperativen Fahrens [17] über die „Grand Cooperative Driving Challenges“ von der Europäischen Kommission gefördert und somit wesentlich bestärkt. So wurden in der Nähe der niederländischen Gemeinde Helmond automatisierte Fahrmanöver, wie kooperatives Einfädeln und kooperatives Passieren von Kreuzungen, aber auch das automatisierte Freimachen einer Rettungsgasse demonstriert - unterstützt durch einen Beitrag der vorliegenden Arbeit, siehe auch [Ş. Taş et al., 2018].

In den vergangenen Dekaden wurden weitere Ziele zur Darstellung der Machbarkeit des hochautomatisierten Fahrens über länger angelegte Demonstrations- und Erprobungsfahrten erreicht. So wurden 2010 im Rahmen der Expo 2010 in Shanghai, China, autonome Fahrten von Parma nach Shanghai durch das Institut VisLab der Universität Parma, Italien, durchgeführt. In einer Kooperation der Daimler AG, jetzt Mercedes-Benz Group AG, dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und dem FZI Forschungszentrum Informatik wurde im August 2013 mit dem autonomen Fahrzeug Bertha auf Basis einer Mercedes-Benz S-Klasse die Bertha Benz Memorial Route zwischen Pforzheim und Mannheim bewältigt [18]. Im Jahr 2015 wurde in den USA ein Audi A7, das Versuchsfahrzeug Jack, von Stanford bis zur in Las Vegas stattfindenden Consumer Electronics Show auf Highways pilotiert bewegt. Das Fahrzeug war in der Lage Spurwechsel und Überholvorgänge durchzuführen, sowie selbstständig zu beschleunigen und zu bremsen [19, 20]. Aufgrund der Ausrichtung und Entwicklung auf die zu bewältigenden Strecken werden diese als Machbarkeitsstudien klassifiziert.

Neben zahlreichen Unternehmen aus dem Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT), wie Google LLC., Apple Inc. oder auch Dienstleister, wie Uber Technologies Inc., die vor allem durch die US-Rechtsprechung begünstigt automatisierte Fahrzeuge in großen Stückzahlen erprobt haben, entstehen seit 2014 auch im europäischen Raum zahlreiche neue Unternehmen und Start-Ups zur Produktion autonomer Fahrzeuge, insbesondere von automatisierten und elektrifizierten Kleinbussen. Diese wurden in zahlreichen Pilotprojek-

## 1 Einleitung

ten mit eingeschränkten Umgebungen und geringen Geschwindigkeiten bis 10 km/h demonstriert, weshalb der Artikel der IT-Fachzeitschrift c't [21] die Erfahrungen dieses eingeschränkten Betriebsbereiches der automatisierten Kleinbusse auch als „ernüchternd“ bezeichnete.

Der rasche Erkenntniszugewinn durch zahlreiche Machbarkeitsstudien und Realfelderproben ging aber auch mit negativen Erfahrungen einher: So kollidierte am 14. Februar 2016 ein autonomer Google Versuchsträger aufgrund einer fehlerhaften Prädiktion mit einem Autobus entlang einer sich verengenden Fahrbahn. Neben Unfällen mit reinen Sachschäden blieben auch Personenschäden nicht aus. So geschah ein tödlicher Unfall eines von Uber ATG betriebenen Entwicklungssystems am 18. Mai 2018 mit einer Fußgängerin, die ein Fahrrad schob. Der von der US-Behörde für Transportsicherheit veröffentlichte Bericht [22] rekonstruiert die Unfallursache und stellt die Verkettung diverser systemischer Fehler dar: Das Opfer wurde aufgrund fälschlich getroffener Modellannahmen fehlerhaft klassifiziert. Eine kurzfristig eingeleitete Notbremsung konnte aufgrund einer deaktivierten Notfallkomponente nicht mehr rechtzeitig durch den Sicherheitsfahrer ausgelöst werden, so dass ein kombiniertes Versagen von Mensch und Maschine zu diesem tragischen Unfall führte. Am 14. August 2023 blockierten zwei festgefahrene Cruise Fahrzeuge einen Notfallwagen mit einem Schwerverletzten, der im Nachgang verstarb [23].

Aber auch städtebauliche Strukturen heutiger, innerstädtischer Bestandskreuzungen wirken hier verstärkend: So wird in der Zeitschrift Stern [24] 2022 im Kontext einer unfallträchtigen Kreuzung in Berlin konstatiert, „dass die meisten Städte nicht darauf ausgelegt sind, all die unterschiedlich großen und unterschiedlich schnellen Verkehrsteilnehmer sicher durch die Städte zu lenken“. So stellt Topp in [25] in Frage, ob aufgrund der gegebenenfalls notwendigen städtebaulichen Maßnahmen, wie Einzäunungen oder Querungshinderungen, zur sicheren Lenkung des heutigen Fuß- und Radverkehr insbesondere auf Shared Spaces und der Möglichkeit damit jederzeit den automatisierten Verkehr im innerstädtischen Umfeld zum Erliegen bringen könnte, automatisiertes Fahren in den Städten überhaupt gewünscht ist. Neuartige Straßenstrukturen zum Schutz von Verkehrsteilnehmern stellen somit ebenfalls neue Herausforderungen an die hochautomatisierten Fahrfunktionen.

Der Blick auf die Historie automatisierten Fahrens zeigt den Fortschritt von dedizierten Fahrversuchen bis hin zu kontrollierten Machbarkeitsstudien durch groß angelegte Erprobungen im Feld auf. Dabei kommt es zu Unfällen mit verletzlichen Verkehrsteilnehmern, wie Fußgängern. Insbesondere in Betriebsbereichen im urbanen Umfeld spielen verkehrs- und städteplanerische Aspekte mit ein. Fahrerassistenzsysteme und hochautomatisierte Fahrfunktionen müssen daher gesamtheitlich und risikofrei unter einer Vielzahl von dynamischen Situationen insbesondere mit Verkehrsteilnehmern getestet und erprobt werden. Dazu müssen diese Systeme frühstmöglichst im Entwicklungsprozess diesen Herausforderungen, wie in Simulationen, gegenübergestellt werden, und somit einen Robustheitsgrad sicherstellen, bevor in die Realerprobung übergegangen wird.

## 1.2 Ausgangssituation und Problemstellung

Autonome Fahrzeuge werden den sogenannten Cyber-Physikalischen Systemen (CPS) zugeordnet. Diese sind nach [26] wie folgt definiert:

Technically, cyber-physical systems are integrations of computation, networking, and physical dynamics, in which embedded devices are massively networked to sense, monitor, and control the physical world.

Sie unterscheiden sich somit von typischen Software-, beziehungsweise Hardwaresystemen, indem sie direkt mit der realen, physikalischen Umgebung über Sensoren und Aktoren interagieren. Sie basieren auf Software-gestützten, nicht selten KI-basierten Entscheidungsprozessen, die mit realen, physikalischen Umgebungen und damit dem Menschen direkt kooperieren. Neben autonomen Fahrzeugen gehören ebenso städtische Stromversorgungsnetzwerke, Verkehrsmanagementsysteme, aber auch medizinische und robotische Systeme, wie fahrerlose Transportsysteme oder unbemannte Luftfahrzeuge, dieser Systemklasse an.

Damit diese Klasse von Systemen gefahrenlos mit ihrer Umgebung interagieren, muss der Entwicklungsprozess strukturiert angeleitet, vor allem aber hin zu einer Zertifizierbarkeit gebracht werden. Prüfstände haben das Ziel, die Erprobung und Bewertung unter möglichst realistischen, gleichzeitig aber auch beobachtbaren und kontrollierbaren Umständen zu ermöglichen, wie

- Interaktionen mit dem Menschen gefahrenlos abbild- und darstellbar machen
- Vielfältigkeit der realen Umgebungen, Arbeitsräume und Betriebsbereiche nachbilden, und
- ausführliche, nachvollziehbare und beobachtbare Experimente für den funktionalen Aufbau dieser Systeme ermöglichen.

Im allgemeinen Verkehrsgeschehen mit assistierten und hochautomatisierten Fahrzeugen lassen sich zahlreiche Faktoren identifizieren, die zu kritischen Situationen und somit zur Gefährdung der beteiligten Verkehrsteilnehmer führen können. Diese sind folglich für eine Absicherung im Entwicklungsprozess über geeignete Methoden abzubilden. Neben einer verkehrsumweltzentrierten Perspektive, aus der relevante Teilnehmer einer Verkehrsszene und ihr Beitrag zu einer Szenenkritikalität abgeleitet werden, können auch die wesentlichen Bestandteile eines automatisierten Fahrsystems in den Fokus gerückt werden.

Nach dem aktuellen Stand der Technik gibt es jedoch für hochautomatisierte Fahrsysteme ab Automatisierungsstufe 3 nach SAE oder VDA e. V. noch keinen standardisierten Absicherungs-, beziehungsweise Entwicklungsprozess [27]. Normen aus der Automobilindustrie, wie die ISO26262 zur Funktionalen Sicherheit von Straßenfahrzeugen (engl.: „*functional safety*“), werden diesbezüglich weiterentwickelt oder fokussieren sich, wie die ISO/PAS21448 (engl.: „*safety of intended functionality*“) zur Sicherheit der Sollfunktion eines Straßenfahrzeugs auf

## 1 Einleitung

die Absicherung von assistierten Systemen der Stufen 1 und 2 [27]. Dabei sind Vorgehensmodelle und Testverfahren zur Validierung und Verifikation dieser Systeme wesentlicher Bestandteil eines solchen zu etablierenden Entwicklungs- und damit Absicherungsprozesses, der „einer Freigabe vorausgeht und eine Sicherheitsargumentation hervorbringt“ [28, S. 1254].

Werden die aus der Realerprobung abzuleitenden statistischen Nachweise betrachtet, ergeben sich nach Wachenfeld und Winner [29] für einen Autobahnpilot  $6.6 \cdot 10^9$  zu erbringende Kilometer. Die Betrachtung von Kalra [30] ergibt circa 8.8 Milliarden benötigte Meilen für ein automatisiertes Fahrzeug, und daher bei einer angenommenen Flottengröße von 100 autonomen Fahrzeugen, die sich ununterbrochen in der Erprobung befinden, eine Erprobungszeit von 400 Jahren. Somit ist die Erprobung eines selbst hypothetisch sicheren Fahrzeugs wirtschaftlich nicht durchführbar. Dies wird nach Wachenfeld und Winner auch als *Zulassungsfalle* betitelt.

Einen möglichen Ausweg stellt dabei ein strukturiertes Vorgehen durch virtuelle, simulative Testumgebungen mittels Ver- oder Vorlagerung [31, S.4] (engl.: „*frontloading*“) dar. Wichtige Erprobungs- und Absicherungsschritte gilt es dabei möglichst früh im Entwicklungsprozess durchzuführen. Die Vorgehensweise des X-in-the-loop (XIL) [32] setzt dabei eine Komponente oder einen Komponentenverbund, auch als Prüfling oder System-under-Test (SuT) bezeichnet, mit einer entsprechenden, plausiblen Umweltsimulation in einen kontrollierbaren und einsehbaren Testverbund. Dies findet sukzessiv über Modelle, Software bis hin zur Realisierung in als in Hardware gegossene Steuergeräte statt.

Simulationen setzen sich aus diversen Modellen zusammen, die jedoch in der Regel problembehaftet sind: Nach der allgemeinen Modelltheorie von Stachowiak [33], wird ein Modell als Abbildung eines Realitätsausschnitts mittels den drei Merkmalen Abbildung, Verkürzung und Pragmatismus definiert: Ein Modell ist somit eine Repräsentation eines natürlichen Originals, welches die für einen Domänenexperten relevanten Eigenschaften und Verhalten abbildet. Schließlich sind diese nicht universell, sondern für einen gewissen Einsatzzweck hin erstellt und damit zweckgebunden. Modelle unterliegen außerdem weiteren pragmatischen Randbedingungen, wie der zur Verfügung stehenden Rechenzeit und Aufwand zur Parametrierung, die den Einsatz dieser Modelle gegebenenfalls einschränken. Die Aussagefähigkeit simulativer Ergebnisse hängt von Qualität und Güte der verwendeten Modelle ab. Fehlerhafte Modellannahmen führen zu fehlerhaften Bewertungen des Gesamtsystems.

Die integrative Erprobung des Gesamtsystems Fahrzeug findet im Anschluss auf Prüfgeländen und innerhalb der Felderprobung statt. So können beispielsweise mittels Schlittenzügen bewegbare Fußgänger-Dummies verwendet werden, um definierte Szenarien kontrollierbar und vollständig beobachtbar zu bewerten. Bei Erprobungsfahrten besteht jedoch lediglich Einblick in die durch das Fahrzeug wahrgenommenen Aspekte der Verkehrsumgebung, die zum jeweiligen Aufzeichnungszeitpunkt und -ort wahrhaftig vorlagen. Diese Grundwahrheit (engl.: „*ground truth*“) ist aus den reinen Aufzeichnungen ohne eine gegebene

ne Kontrollierbarkeit und Observierbarkeit der Testumgebung selten ersichtlich und ableitbar. Gerade dieser Einblick ist jedoch maßgeblich für die Bewertung automatisierter Systeme ab Automatisierungsstufe 3. Daher wird zumeist zusätzliche Referenzsensorik, entweder auf dem Versuchsträger selbst oder in direkter Umgebung [34, 35], zur Bewertung angebracht.

Es wird offensichtlich, dass bei einem Wechsel von den rein simulativ unterstützten Absicherungsmethoden hin zu den Realerprobungen ein Kontroll- und Einflussnahmeverlust sowie Beobachtungsverlust für die Testumgebungen eintritt. Die sich hier öffnende Lücke stellt dabei ein wesentliches Potentialfeld dar, um Eigenschaften und Vorteile beider bisher konträrer Ansätze zu vereinen.

## 1.3 Zielsetzung und Beiträge der Arbeit

Innerhalb des Spannungsfelds zwischen Simulation und Realerprobung setzt die vorliegende Arbeit ein. Sie stellt das Konzept für virtuell erweiterte Testfelder vor, welches diese Lücke mit einer Testmethodik für den Einsatz auf Prüfgeländen als abgesperrten Bereichen und Testfeldern im öffentlichen Verkehrsraum schließt. Es werden technologische, methodische und algorithmische Bausteine erarbeitet und integriert, um Flexibilität und Skalierbarkeit bei gleichzeitiger Gewährleistung von Kontrollierbarkeit und Beobachtbarkeit zu erhalten. Die Konzeption eines solchen Testsystems wird in der vorliegenden Arbeit durch folgende Fragestellung motiviert:

---

#### **Übergeordnete Forschungsfrage:**

Welche technischen, methodischen und algorithmischen Bausteine werden benötigt, um automatisierte Versuchsträger innerhalb von Prüfgeländen und Testfeldern in kritischen, überwiegend innerstädtischen, und in zwischen modellbasierten und datengetriebenen skalierbaren Szenarien zu bewerten?

---

Diese Fragestellung wird in spezifische Leitfragen unterteilt, deren Beantwortung zur Lösung der übergeordneten Forschungsfrage beitragen:

1. Wie lässt sich ein Umgebungsmodell derart gestalten, dass sich verschiedene innerstädtische Szenarien auf bestehende Straßenstrukturen von Prüfgeländen und Testfeldern abbilden lassen?
2. Wie lassen sich Expertenwissen-basierende Verhaltensmodelle durch die Beobachtung realer Verkehrsteilnehmer ersetzen, und somit datengetriebenes Verhalten in den Testprozess einbinden?

## 1 Einleitung

3. Welche typischen Schnittstellen einer hochautomatisierten Fahrfunktion können genutzt werden, um die virtuellen Umweltmodelle mit den realen Sensordaten zu fusionieren und einzuspeisen?
4. Wie muss eine entsprechende Co-Simulationsarchitektur gestaltet werden, um mehrere Fahrzeuge und Verkehrsteilnehmer innerhalb eines Testes berücksichtigen zu können?

Zur Beantwortung der Leitfragen werden in den einzelnen Kapiteln wissenschaftlich-technische Beiträge vorgestellt, die im Rahmen diverser Forschungsprojekte erforscht, entwickelt, und über die wissenschaftliche Gemeinschaft veröffentlicht wurden.

### **Wissenschaftlich-technische Beiträge:**

Zur Bewertung von hochautomatisierten Fahrfunktionen wird in der vorliegenden Dissertation ein Testsystem vorgestellt, welches kritische urbane Verkehrsszenarien auf Prüfgeländen und Testfeldern darstellbar macht und dabei über verschiedene Zugänge dem zu testenden, hochautomatisierten Fahrsystem zugeführt werden kann. Folgende Bestandteile werden hierzu als Beiträge zum Stand der Forschung in der Arbeit vorgestellt<sup>1</sup>:

1. Aufbau skalierbarer, realer statischer Szenarienumgebungen auf Prüfgebieten und Testfeldern, siehe [Zofka et al., 2016b, Fleck et al., 2018, Zofka et al., 2018a, Zipfl et al., 2020, Zofka et al., 2022, Ochs et al., 2023a]
2. Integration verschiedener Modellierungen und datengetriebener Einbettung von realen Verkehrsteilnehmern am Beispiel von Fußgängern, siehe [Zofka et al., 2015, Zofka et al., 2018b, Zofka et al., 2020]
3. Verfahren zur Einspeisung gemischt virtuell-realer Sensordaten auf verschiedenen Ebenen der hochautomatisierten Fahrfunktion, siehe [Zofka et al., 2014b, Zofka et al., 2018a]
4. Konzept einer flexiblen und verteilten Co-Simulationsarchitektur zur Verbindung der beschriebenen Einzelkonzepte, siehe [Zofka et al., 2020, Zofka et al., 2023].

Zusammengefasst wird in der vorliegenden Arbeit das Konzept virtuell erweiterter Testfelder und Prüfgelände vorgestellt. Strukturiert mittels eines Metamodells ermöglicht das Konzept die Integration realer und virtueller statischer Umgebungselemente und Verkehrsteilnehmer in einer gemeinsamen Testumgebung und setzt den Schwerpunkt auf das Wechselspiel realer Objekte mit dem dynamischen Verkehrsteilnehmerverhalten. Es wird aufgezeigt, wie die damit erzeugten Szenarien auf verschiedenen Abstraktionsebenen einer hochautomatisierten Fahrfunktion zugeführt werden können. Damit wird eine Test-, Beobachtungs- und Aufzeichnungsumgebung erreicht, die eine Bewertung von hochautomatisierten Fahrfunktionen in innerstädtischen Szenarien erlaubt.

---

<sup>1</sup>Zur Verdeutlichung eigener Beiträge wird ein abweichender Zitierstil verwendet.

Die vorliegende Arbeit ist weiteren zahlreichen Fragestellungen gegenüber abzugrenzen, wie einer übergreifenden Systematik zur Führung des Sicherheitsnachweises, unter anderem aber auch weiteren darin einzubettenden Prozessen und Methoden, wie der Absicherung von Fahrzeugdynamiken, Absicherung mittels formalen Methoden, der Absicherung unter verschiedensten Situationsaspekten, wie Straßenoberflächen und Witterungsaspekten. Diese sind nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit und verbleiben daher zur Lösung weiteren Forschungsarbeiten.

## 1.4 Struktureller Aufbau der Arbeit

Die inhaltliche Struktur der vorliegenden Arbeit ist in drei wesentliche, inhaltliche Blöcke gegliedert, siehe folgende Abbildung 1.3.

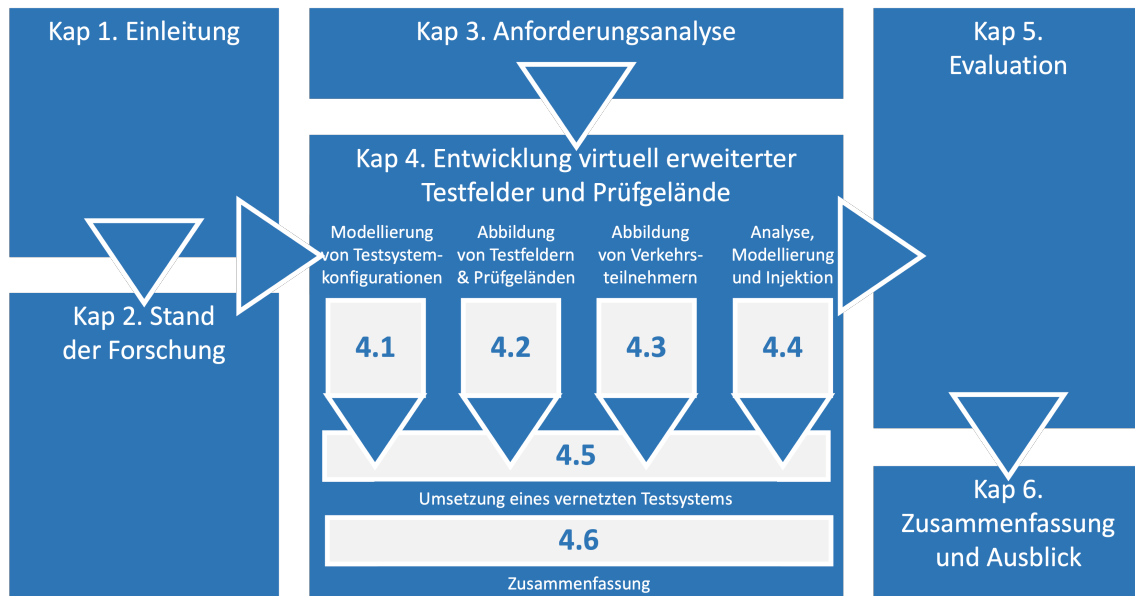


Abbildung 1.3: Struktureller Aufbau der vorliegenden Arbeit.

Der erste inhaltliche Block der vorliegenden Arbeit führt in den wissenschaftlichen und technologischen Kontext automatisierter Fahrsysteme und Absicherungsmethodiken ein. Hierzu wird eine Einordnung in die Entwicklung technischer Systeme hin zu hochautomatisierten Fahrfunktionen in Kapitel 1, und eine Beschreibung des relevanten Stands der Forschung in Kapitel 2 gegeben.

Die Ausgestaltung des wissenschaftlichen Konzepts und der Umsetzung zum Aufbau virtueller Testfelder wird im zweiten Block innerhalb der Kapitel 3 und 4 beschrieben. Dieser Block wird von Kapitel 3 angeführt, welches aus der Anforderungsanalyse der urbanen Verkehrsszenarien und den dort einzusetzenden hochautomatisierten Fahrfunktionen eine Referenzarchitektur, sowie die relevanten Anforderungen an ein Testsystem herausdestilliert. In Kapitel 4.1 wird das

## *1 Einleitung*

Metamodell einheitlich beschrieben. Die aus dem Metamodell abgeleiteten Modellierungen werden anschließend konkretisiert, die Modellierung der statischen Umgebung in Unterkapitel 4.2, die Umgebungsdynamik in Unterkapitel 4.3, sowie die Einspeisung in Unterkapitel 4.4. Schließlich erfolgt in Kapitel 4.5 die Zusammenführung der genannten Beiträge innerhalb eines verteilten Testleitstands mittels einer flexiblen Co-Simulationsarchitektur.

Der dritte Block eröffnet mit Kapitel 5 die Darstellung der Evaluation des entwickelten Verfahrens durch Anwendung auf Versuchsträger im Testfeld Autonomes Fahren Baden-Württemberg (TAF-BW). Schließlich beschließt Kapitel 6 mit einer Zusammenfassung der erreichten Beiträge und zeigt den durch diese Arbeit eröffneten Forschungsbedarf in Form aufbauender Fragestellungen auf.



## 2 Übersicht über den Stand der Forschung

Das Kapitel widmet sich dem Stand der Technik und Forschung im Kontext der Validierungs- und Verifikationsmethoden des automatisierten Fahrens. Der Abschnitt 2.1 führt in die für das Verständnis der vorliegenden Arbeit notwendigen und wesentlichen Grundlagen hochautomatisierter und autonomer Fahrzeuge ein. Da vernetzte Fahrzeuge über Verkehrsinfrastrukturen mit der Umgebung und anderen vernetzten Fahrzeugen und Verkehrsteilnehmern kommunizieren können, werden in Abschnitt 2.2 die Systemgrenzen über ein vernetztes Fahrzeug ausgeweitet und eine Einführung in den aktuellen Stand der Fahrzeug- und Infrastrukturvernetzung gegeben.

Basierend auf der Betrachtung einer hierfür typischen elektrisch-elektronischen Architektur (E/E) eines hochautomatisierten Fahrzeugs ergeben sich Bedarfe die Komponenten und Teilsysteme eines solch komplexen Systems zu bewerten. Um hier den Rahmen für die entsprechende Betrachtungsweise zu geben, werden die notwendigen Begrifflichkeiten in Abschnitt 2.3 in den Kontext der Entwicklungsprozesse und -methoden in der Automobildomäne gesetzt. Die hierfür relevanten Methoden werden den *open loop*-Verfahren, wie beispielsweise mit Testdatensätzen, in Abschnitt 2.4 und den *closed loop*-Verfahren unter Zuhilfenahme von Simulation in Abschnitt 2.5 gegenübergestellt.

Auf diese Gegenüberstellung folgend wird auf Testverfahren und -umgebungen mit geschlossenen Regel- und Testschleifen Bezug genommen. Hierzu wird auf verschiedene Instanzen des X-in-the-loop Paradigmas über die Betrachtung des V-Modells fokussiert. Daran anschließend wird in Abschnitt 2.6 auf die Modellbildung und Simulation von verschiedenen Aspekten von Verkehrsszenarien im Kontext autonomen Fahrens eingegangen. Hierbei werden Aspekte der Co-Simulation, wie auch kürzlich aufgekommene Ansätze datengetriebener KI-Methoden zur Modellbildung betrachtet. Schließlich werden in Abschnitt 2.7 Ansätze aus dem Bereich der Mixed Reality betrachtet, die während der Entstehungszeit der vorliegenden Forschungsarbeit aufgekommen sind.

Der abschließende Abschnitt 2.8 fasst wesentliche Erkenntnisse aus dem Stand der Technik zusammen und bildet den Übergang zum anschließenden Kapitel 3.

## 2.1 Das autonome Fahrzeug als komplexer Systemverbund

Die E/E-Architektur eines Fahrzeugs beschreibt die Gesamtheit aller eingebetteten Systeme eines heutigen Fahrzeugs und deren Vernetzung. Diese strukturiert die über das Fahrzeug verteilten Sensoren und Aktoren mit Steuergeräten und Fahrzeugcomputern. Mit steigender Automatisierung des Fahrzeugs zur Unterstützung bis zur gesamtheitlichen Übernahme der Fahraufgabe, steigt auch die Komplexität dieser Architektur über die notwendigen beteiligten und miteinander interagierenden eingebetteten Systeme an. Das autonome Fahrzeug ist dabei als ein umgebungswahrnehmendes Messinstrument, auf Software-gestützten und damit nicht selten KI-basierten Entscheidungsprozessen, und mit der realen Verkehrsumgebung und damit Fahrzeugen und Menschen direkt kooperierendes Cyber-Physikalisches System zu interpretieren.

Die vorliegende Arbeit stützt sich dabei auf die Definition eines **Systems** nach Winner [36] wie folgt:



**Definition 1.** A group of elements which are relevant (and not merely useful) for achieving a purpose, which interact with each other, and which have a structure within predefined boundaries.

Die in einer hochautomatisierten Fahrfunktion als System interagierenden funktionalen Komponenten lassen sich wie folgt charakterisieren:

Die Umfelderkennung stützt sich dabei auf sogenannte **exterozeptive Sensoren und integrierte Sensorsysteme**, die das direkte Umfeld des Fahrzeugs erfassen. Dabei wird meist auf eine redundante oder komplementäre Auslegung geachtet, um beispielsweise Nachteile verschiedener physikalischer Erfassungsprinzipien von Kamera-, Radio Detection and Ranging (Radar), Light Detection and Ranging (Lidar) oder Ultraschallsystemen auszugleichen. Während Kamerasysteme auf der Erfassung des sichtbaren wie auch nicht-sichtbaren Lichts, wie Infrarotkameras, basieren, gründen zuletzt genannte Sensorsysteme auf dem sogenannten Time-of-Flight (ToF) Prinzip. Dabei werden elektromagnetische oder Schallwellen emittiert. Über die jeweils empfangene Reflexion und deren Laufzeit kann ein Rückschluss auf den zurückgelegten Weg und weitere Eigenschaften der getroffenen Oberflächen gezogen werden.

Dem stehen **propriozeptive Sensoren** gegenüber. Diese messen Zustandsgrößen des Fahrzeugs und seiner verschiedenen Komponenten selbst, wie beispielsweise einzelne Raddrehzahlen, Lenk- oder Gierwinkel des Fahrzeugs. Diese werden gleichermaßen für Funktionen der Perzeption, beispielsweise zur Schätzung der eigenen Geschwindigkeit oder der anderen Objekte im Verkehrsumfeld, benötigt.

Die **Lokalisierung** erfolgt typischerweise über integrierte, globale Navigations-satellitensysteme gestützt mit Trägheitsnavigationssystemen (GNSS/INS). Während eine Erfassung der globalen, sphärischen Position über eine Triangulation von zur Verfügung stehenden Satellitensignalen niederfrequent erfolgt, stützt eine integrierte Koppelnavigation mittels Gyroskop, Beschleunigungsmesser und Kompass diese mit hochfrequenten Messungen. Damit wird eine hochfrequente Lokalisierung bei gleichzeitiger Kompensation des Inertialsensorikdrifts ermöglicht. Weiterhin werden **hochgenaue Karten** als zusätzliche Sensorquelle herangezogen. Sie stellen generell a-priori Wissen über die zu befahrenden Strecken dar. Dabei werden statische Merkmale verzeichnet, die mit onboard Sensoren nicht erkannt werden oder als zusätzliche, stabilisierende Datenquelle herangezogen werden können. Beispiele hierfür sind Fahrstreifen, Fahrbahnbegrenzungen, Fußgängerüberwege, Gebäudestrukturen oder Verkehrszeichen. Diese Merkmale werden u. a. zur Lokalisierung oder Prädiktion herangezogen.

Bereits mit Fahrerassistenzfunktionen ausgestattete Fahrzeuge haben die für die jeweilig zu unterstützenden Fahrmanöver entsprechende **Aktorik** verbaut. So sind für den Fahreingriff oder die Ausführung einer Fahrfunktion die Ansteuerung von Motor, Lenkung, Gangwahl, oder auch der Fahrzeugbeleuchtung möglich. Diese heutigen, auch als **X-by-Wire** bezeichneten, Systeme setzen dabei meist auf eine elektrische anstelle einer mechanischen Kopplung.

E/E-Architekturen lassen sich nach verschiedenen Paradigmen gestalten: Bisherige Ansätze zeichnen sich insbesondere aus vielen verschiedenen Funktionen aus, die innerhalb quer über das Fahrzeug verteilte ECU realisiert sind. Diese sind über ein Gateway und über Fahrzeugbussysteme, wie CAN, miteinander verknüpft [37]. Domänenspezifische Architekturen verbinden verteilte und zentralisierte Vernetzungsaspekte, indem Steuergeräte basierend auf den von ihnen verwalteten Domänen (Antriebsstrang, Infotainment, ...) gruppiert und organisiert werden. Jedes dieser Domänen wird dabei von einem dedizierten domänenspezifischen Steuergerät verwaltet. Momentan untersuchte zonenorientierte Architekturansätze zeichnen sich durch eine Vernetzung leistungsstarker Zonen-Steuergeräte mit einer hochperformanten, zentralen Rechnerkomponente aus. Ein Zonen-Steuergerät kümmert sich dabei um die diesem zugewiesenen Sensoren und Aktuatoren, die nicht domänenspezifisch, sondern geometrisch-räumlich zusammenliegen, siehe bspw. Energieversorgungssystem der UNICARagil-Plattform [38]. Abbildung 2.1 stellt den FZI Versuchsträger CC-NG mit ausgewählten Sensoren dar, die über CAN und Automotive Ethernet mit Rechnersystemen innerhalb der E/E-Architektur miteinander verbunden sind, siehe [Heinrich et al., 2024].

Die den E/E-Architekturen zugrundeliegenden Systemarchitekturen lassen sich generell in modulare, komponentenweise, beispielsweise in Schichten angeordneten Architekturen und sogenannten Ende-zu-Ende Modellen (engl. „end2end“) unterscheiden. Im Gegensatz zu auf Regeln basierenden Systeme zeichnen sich Ende-zu-Ende Modelle dadurch aus, dass Sensordaten direkt auf Aktuatorbefehle, wie Beschleunigen oder Bremsen, abgebildet werden. Anstelle der Regeln

## 2 Übersicht über den Stand der Forschung

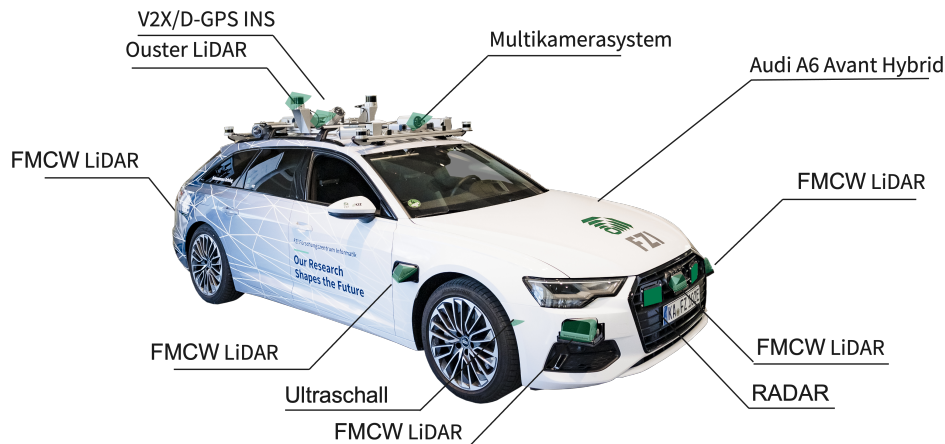


Abbildung 2.1: Ausgewählte Sensoren des automatisierten Fahrzeugs CC-NG des FZI. Die Sensoren sind mittels Hochgeschwindigkeitsethernet und CAN an einen zentralen Fahrzeugrechner zur Verarbeitung der Sensorsignale und einen Planungsrechner zur sicherheitskritischen Ausführung der Aktuatorenregelung verbunden. Mit freundlicher Genehmigung von M. Zipfl.

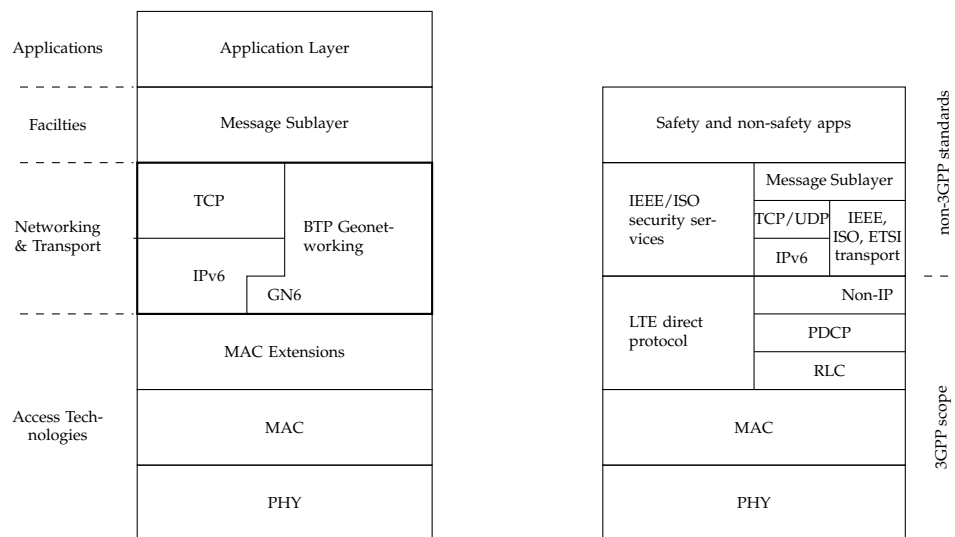
werden hierzu lernende Systeme, wie tiefe neuronale Netze, verwendet, die aus Erfahrungen und Beobachtungen lernen. Diese müssen damit nicht regelbasiert programmiert, sondern können über Messdaten, Flottenfahrten erlernt werden. So kann beispielsweise ein Spurhalteassistent auf Basis eines auf Kameradaten erlernten CNN [39] oder darauf aufbauend Spurhalten, -wechsel und Abbiegeassistent für Kreuzungen umgesetzt werden [40]. Die Lösung der Fahraufgabe über einen monolithischen Block bringt neben fehlenden Schnittstellen und fehlender Nachvollziehbarkeit zahlreiche Herausforderungen mit sich [41], insbesondere vor dem Hintergrund der Absicherung.

In der Studie von Taş [42] werden zahlreiche dieser funktionalen Systemarchitekturen und deren Einordnung in das *Sense-Plan-Act* Muster diskutiert. Aktuelle veröffentlichte Machbarkeitsstudien von automatisierten Fahrfunktionen setzen die jeweils zugrundeliegenden funktionalen Systemarchitekturen in direkten Bezug zu den Versuchsträgern und Experimentalfahrzeugen. Dazu gehören unter anderem das Fahrzeug FORTISS FORTUNA [43], der auf einem Porsche Cayenne basierende Versuchsträger JUPITER [44], sowie die auf einem Volkswagen T7 basierende Versuchsplattform EDGAR [45] der TU München.

Weitere Arbeiten stellen die realisierten Hochautomatisierungssysteme in Form funktionaler Software-Bausteine in den Kontext der jeweiligen zu bewältigenden Verkehrssituationen: So stellt Hellmund in [46] die auf Robot Operating System (ROS) [47] basierende Laufzeitumgebung für automatisiertes Fahren vor, die für die Grand Cooperative Driving Challenge (2016) [Ş. Taş et al., 2018] Anwendung fand. Zahlreiche Open Source Ansätze wie AUTOWARE [48, 49, 50] und APOLLO stehen mittlerweile frei zur Verfügung. So wird APOLLO unter [51] oder AUTOWARE für aufbauende Fahrumgebungen und Stacks verwendet [52, 53].

## 2.2 Erweiterung der Systemgrenzen durch Vernetzung

Zur Berücksichtigung der Vernetzung von Fahrzeugen (V2X) mit der Umgebung muss der Systembegriff über das Fahrzeug selbst hinaus erweitert werden. Die funkbasierte Vernetzung kann über das assistierte Fahren bis zur Automatisierungsstufe 3 unterstützen, indem der Fahrzeugführende in seiner Fahraufgabe durch Informationen aus der Vernetzung mit seiner Verkehrsumgebung, wie der Anzeige von Lichtsignalanlagenzuständen oder der Unfall- oder Baustellenwarnung, unterstützt wird. So erlaubt die Vernetzung die lokale Sicht des Systems, um Verkehrsbereiche und -aspekte, die nur ungenügend aus Fahrzeugperspektive ersichtlich wären, zu ergänzen. Dieser ergänzende Fahrzeugsensor ermöglicht somit die Wirksamkeit bestehender Assistenzsysteme zu steigern, neue Funktionalität zu schaffen, und hochautomatisiertes Fahren über verschiedene Kommunikationskanäle zu unterstützen.



(a) IEEE 802.11p-basierter Protokoll-Stack.

(b) 3GPP LTE C-V2X Protokoll-Stack.

Abbildung 2.2: Vergleich der V2X-Netzwerkprotokoll-Stacks IEEE 802.11p (EU-Variante) und 3GPP LTE C-V2X. Eigene Darstellung nach [54, 55].

V2X kann über standardisierte Kommunikationsmedien und -protokolle, wie beispielsweise IEEE 802.11p oder das Mobilfunknetz-basierte C-V2X umgesetzt werden. Im Wesentlichen unterscheiden sich ETSI ITS-G5, die EU-Version des C-ITS Stacks, und 3GPP LTE C-V2X in den unteren Schichten des Netzwerkprotokollstacks, konkret der physikalischen Schicht (PHY) und der Medienzugriffssteuerungsschicht (MAC), siehe folgende Abbildung 2.2. IEEE 802.11p nutzt hierzu das Basistransport- und Geonetworking-Protokoll nach ETSI EN 302 636 [56] auf der Netzwerk- und Transportschicht. Letzteres verantwortet das Routing und die Verbreitung von Nachrichten entlang vernetzter Knotenpunkte auf Basis geo-

graphischer Koordinaten. Es definiert ebenfalls die maximale Paketgröße der Nutzdaten, die sogenannte Maximum Transmit Unit (MTU), von 1398 Bytes [56], zur Weitergabe an den Access Layer. Man unterscheidet hier zwischen infrastrukturellen, straßenseitig angebrachten Stationen, den sogenannten Roadside Unit (RSU), und fahrzeugseitig angebrachten Stationen, den Onboard Unit (OBU). Beide basieren auf der ETSI ITS-G5-Referenzarchitektur zum Versand, Empfang, der Kodierung und Dekodierung von Nachrichten durch Dienste.

So überbringen CAM [57] regelmäßig Informationen über einzelne Verkehrsteilnehmer in der Umgebung, die Rückschlüsse auf ihre Position, Bewegung und Zustände erlauben. DENM [58] erlauben die ereignisgesteuerte Übertragung von sicherheitskritischen Informationen einer lokalen Umgebung zur frühzeitigen Warnung vor beispielsweise Unfällen oder Baustellen. Schließlich werden mittels SPATEM und MAPEM Lichtsignalanlagenzustände nebst zugehörigen Kreuzungstopologien übermittelt und erlauben, über entsprechende Rückkanäle, Konzepte wie Vorrangschaltung (beispielsweise für Anwendungen des ÖPNV) umzusetzen [59].

Während die Protokolle und Nachrichtenpakete zumeist bereits standardisiert sind, wird deren Befüllung noch uneinheitlich gehandhabt, wie SPATEM auf deutschen Testfeldern [60]. Vertiefende Informationen finden sich in [54, 55, 61].

### 2.3 Testen, Verifikation und Validierung

Die im Folgenden aufgezeigten Methoden werden dabei häufig unter der Begrifflichkeit „Validierung und Verifikation“ (V&V) gruppiert und gebündelt formuliert. Die vorliegende Arbeit stützt sich auf die Definitionen von Schäuffele [62].

Die Verifikation und Validierung sind dort wie folgt definiert:



**Definition 2.** Die **Verifikation** ist der Prozess zur Beurteilung eines Systems oder einer Komponente mit dem Ziel festzustellen, ob die Resultate einer gegebenen Entwicklungsphase den Vorgaben für diese Phase entsprechen. Software-Verifikation ist demnach die Prüfung, ob eine Implementierung der für den betreffenden Entwicklungsschritt vorgegebenen Spezifikation genügt.

Die Verifikation umschließt verschiedene Ansätze, die sich in statische Techniken, wie Code-Review und Analyse, sowie dynamische Tests, Komponenten- und Integrationstests, wie Black- und White-Box Tests, unterteilen.

Die Validierung umfasst Methoden der Animation, wie der formalen Spezifikation, der Modellierung und Simulation, Rapid Prototyping sowie der System- und Akzeptanztests, Tests zur funktionalen Leistungsfähigkeit oder auch Äquivalenzklassentests.



**Definition 3.** Die **Validierung** ist der Prozess zur Beurteilung eines Systems oder einer Komponente mit dem Ziel festzustellen, ob der Einsatzzweck oder die Benutzererwartungen erfüllt werden. Funktionsvalidierung ist demnach die Prüfung, ob die Spezifikation die Benutzeranforderungen erfüllt, ob überhaupt die Benutzerakzeptanz durch eine Funktion erreicht wird.

Während die Verifizierung also die Konformität der umgesetzten Software mit der ursprünglichen Spezifikation prüft, stellt die Validierung die letztendliche Akzeptanz des Systems in der endgültigen, angedachten Zielumgebung mit dem Endnutzer in den Vordergrund. Schäuuffele verweist in [62] darauf, dass zahlreiche Methoden für die Validierung als auch Verifikation gleichermaßen eingesetzt werden.

Der Vorgang des Testens ist nach dem IEEE Standard Glossar für Softwareentwicklung [63] wie folgt definiert:



**Definition 4. Testing** is the process of operating a system or component under specified conditions, observing or recording the results and making an evaluation of some aspects of the system or component.

Der Vorgang des Testens wurde in der dieser vorliegenden Arbeit zugrundeliegenden Erhebung von Testverfahren [Stellet et al., 2015] in den Kontext erweiterter Fahrerassistenzsysteme und hochautomatisierter Fahrfunktionen gesetzt. Dabei wurden folgende Zusammenhänge identifiziert: Testkriterien werden auf mittels einer Referenz beziehbare Metriken abgeleitet. Diese Metriken quantifizieren und geben somit Rückschluss auf den Erfüllungsgrad und damit die Erwartungshaltung an das nach der Durchführung bemessbare Ergebnis unter gegebenen Vor- und Randbedingungen des Testszenarios, siehe Abbildung 2.3a.

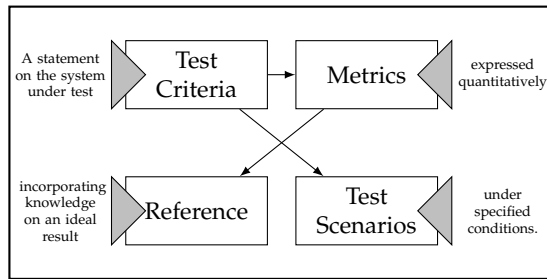
Weiterhin werden in [Stellet et al., 2015] Ansätze zur Ableitung von Testszenarien generell in datengetriebene und expertenwissensbasierte Ansätze unterschieden. Diese können Fall für Fall beispielsweise aus der Systembeschreibung oder Unfalldatenbanken abgeleitet werden, bieten gleichwohl aber nur begrenzte Aussagekraft. Dem gegenüber stehen die dem Verkehr zugrunde liegenden Ansätze. Über die datengetriebene Analyse generelle Strecken- und Routendaten, wie aus der Realerprobung, oder die wissensbasierte Bildung eines Metamodells, beispielsweise Szenarienontologien, können Szenarienkataloge und einzelne Instanzen abgeleitet werden<sup>1</sup>.

Beim Testen kommt eine besondere Rolle den Referenzen zu, siehe Abb. 2.3b. Zur Bewertung einer funktionalen Komponente des automatisierten Fahrsystems wird eine Referenz benötigt, die für den Test, insbesondere den Vergleich, Daten

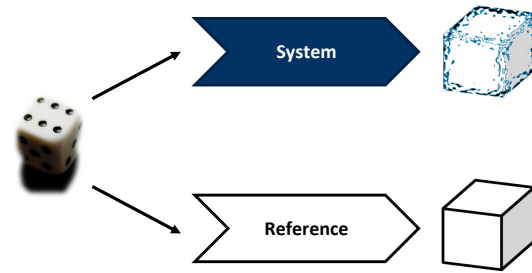
---

<sup>1</sup>Jüngste Forschungsarbeiten und Entwicklungen in diesem Feld fassen diese Sichtweise vor der Verwendung von KI-Modellen auf, siehe Abschnitt 2.6.

## 2 Übersicht über den Stand der Forschung



(a) Zusammenhang zwischen Kriterien, Metriken und Referenzgrößen unter dem Testszenario. Entlehnt an Veröffentlichung [Stellet et al., 2015].



(b) Referenzmesssystem liefert Grundwahrheit für das Abstraktionslevel des Systems selbst. Bildquelle: [Stellet et al., 2015] © 2015 IEEE.

Abbildung 2.3: Taxonomie des Testens zur Bewertung von ADAS und HAD.

mit einer sogenannten Grundwahrheit liefert. Diese Grundwahrheit ist eine postulierte axiomatische Wahrheit und lässt sich auf die Art und Weise der Generierung der Daten und somit deren Ursprung, siehe auch [64, 65], wie über den Ansatz der Messung oder den Ansatz der Simulation, rückführen.

Im ersten Fall der Referenzmessung kann dies durch Nutzung eines aufgrund eines präziseren physikalischen Erfassungsprinzips eines höherwertigen Sensors (höhere räumliche oder zeitliche Auflösung, geringerer Messfehler, ... ) gerechtfertigt werden. Im zweiten Fall wird dies über die Modellbildung realistischer Modelle, beispielsweise durch Expertenwissen oder physikalische Gesetzmäßigkeiten, gelöst. Durch die Modellbildung mittels dieses idealen Wissens repräsentiert die Abbildung in einer simulierten Umgebung möglichst detailgetreu das reale System oder den realen Aspekt. Die Eigenschaft der Grundwahrheit rechtfertigt sich dabei aus dem Nachweis der Validität der verwendeten Simulationsmodelle. Bei beiden Ansätzen gilt, dass eine Verletzung der benannten Eigenschaften unweigerlich zu Fehlaussagen in den Auswertungsergebnissen führt.

Das 3-Kreismodell nach Stellet et al. aus [66] setzt jeweils Lücken zwischen benötigtem, spezifiziertem und schließlich implementiertem Verhalten zueinander in Bezug, siehe Abbildung 2.4. Somit werden Spezifikationslücken erst durch die Validierung offengelegt. Schäuffele verweist in [62, S. 29] auf Untersuchungen, „die gezeigt haben, dass in den meisten Entwicklungsprojekten die Spezifikationsfehler überwiegen“. Verstärkend wirkt hier die sogenannte funktionale Unzulänglichkeit nach [67] ein. Diese besagt, dass aufgrund der zahlreichen, relevanten Einflussfaktoren einer Verkehrsumgebung und den Umständen, dass nicht jede kritische Kombination auch zu einem Fehlverhalten der Funktion führt [68], autonome Fahrfunktionen durch ihre umgebungswahrnehmende Fähigkeiten nicht wie bisherige Fahrzeugsysteme abgesichert werden können. Eine vollumfassende Beschreibung der letztendlichen Verkehrsumgebung, damit Erfassung und Ableitung der möglichen Inputs auf die umgebungswahrnehmende Sensorik und Perzeption, sei schlicht unmöglich.

Generell lassen sich Testverfahren in Open und Closed Loop Tests unterscheiden:



So werden im Bereich der Fahrdynamikerprobung auf Testgeländen „Fahrversuche aus regelungstechnischer Sicht“ [69, S.57] zur Vermessung des Fahrverhaltens dahingehend unterschieden, inwieweit ein Testfahrer das System lediglich anregt oder ein bestimmtes Bewegungsverhalten einzuregeln hat. Fahrmanöver wie die stationäre Kreisfahrt, sprungartiger, sinusförmiger und regelloser Lenkeinschlag werden daher als Open Loop Tests klassifiziert. Andererseits werden Manöver, die der Fahrer aktiv über Bewegungen und Trajektorien einregelt, als gängige Closed Loop Tests bezeichnet, wie 18m und 36m Slalom-Kurs, doppelter Spurwechsel und Lenk-Bremsverhalten [69].

Diese Herangehensweise sich auf den Test von ADAS und HAD übertragen: Bei einem open loop Test werden diesen Verkehrsszenarien in Form von (aufgezeichneten) Datensätzen präsentiert, erneut verarbeitet und damit Bewertung ausgeführt. Die Funktionen und das System haben dabei keinerlei Einfluss auf die Szenarien. Wird das System allerdings mit einem virtuellen Verkehrsszenario in einer Simulation oder einem realen Verkehrsszenario auf einem Testfeld gestellten Szenario konfrontiert, hat das Systemverhalten durch die Wechselwirkung unweigerlich Einfluss auf die Umgebung. Die Auswirkungen von Handlungseingriffen von ADAS oder HAD können dann closed loop mittels Referenzszenarien in Form parametrierbarer Szenarien über Open Simulation Interface (OSI) erfasst und OpenSCENARIO beschrieben werden [70].

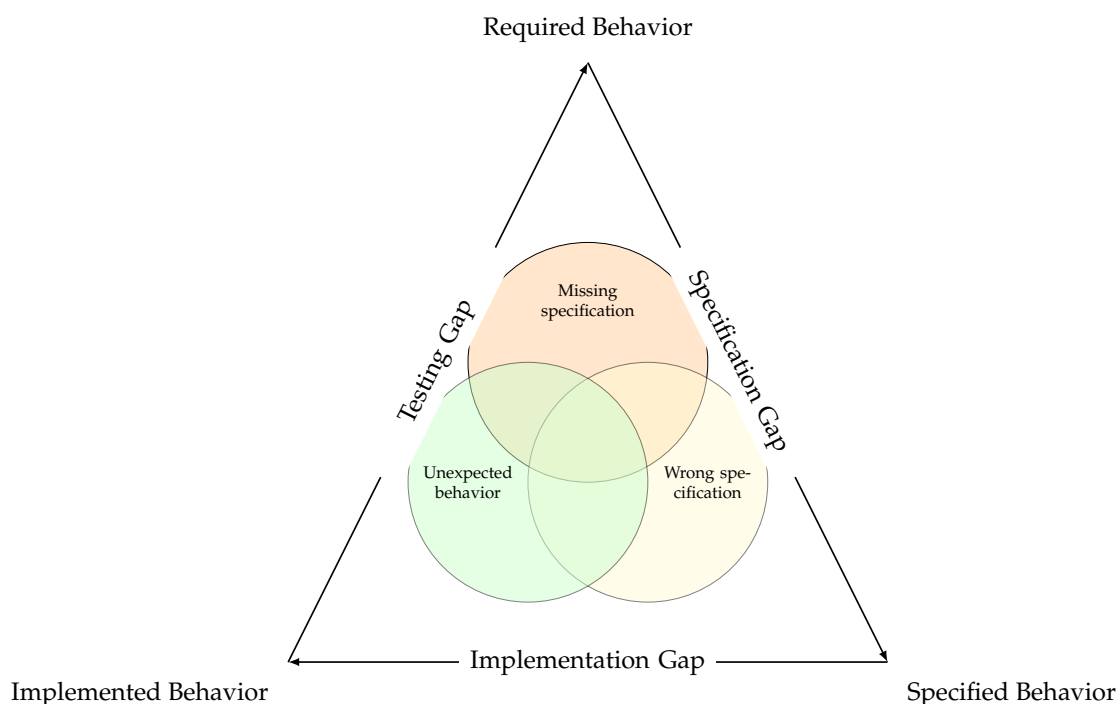


Abbildung 2.4: Das 3-Kreismodell setzt Testen, Validierung und Verifikation und dabei jeweils zu schließende Lücken zueinander in Bezug. Eigene Darstellung entlehnt an [66].

### 2.4 Open Loop Entwicklungs- und Testmethoden

Sensor- und sensornahe Signale, wie beispielsweise Ausgaben von Detektionsalgorithmen, können bei reinen Mess- wie auch Erprobungsfahrten aufgezeichnet werden. Mittels sogenannter open loop-Testverfahren können diese auf Schwächen hin untersucht und optimiert werden. Dies findet typischerweise durch ein sogenanntes virtuelles *Replay* der Fahrt statt, bei dem die Sensor- und sensornahe Signale in die Algorithmen im Labor eingespeist werden. Damit können insbesondere Wahrnehmungs- und Interpretationsalgorithmen getestet und evaluiert werden, die keinen Eingriff in die Fahrdynamik erfordern. Während industrielle Datensätze typischerweise nicht zugänglich sind, hat sich in den letzten Jahren aus dem akademischen Bereich eine breite Community gebildet, die Datensätze frei verfügbar für das Benchmarking neuer Methoden zur Verfügung stellt, siehe Auswahl in Tabelle 2.1 und vertiefende Übersichten in [71, 72, 73, 74].

Ansätze wie *Reactive-Replay* [75], *Adaptive-Replay-to-Sim* [76] oder datengetriebene Resimulation [Zofka et al., 2015] setzen bei Aufzeichnungen an. Das in Aufzeichnungen abgebildete Geschehen kann durch eine Analyse und Veränderung wieder in einen Simulationsraum abgebildet werden und die Daten somit im Labor nutzbar gemacht werden. Das Verfahren „Virtual Assessment of Automation in Field Operation“ [77, 78, 79] erprobt Funktionen open loop während der Fahrt. Die Funktion läuft im Hintergrund des assistierten oder automatisierten Fahrzeuges, und die Ausgabedaten werden anstelle der Fahrzeugaktuatorik, an eine Aufzeichnungs- und Auswertungseinheit weitergereicht, und mittels Simulation ausgewertet. So werden in [80] Sensordaten der Realfahrterprobung erfasst und der weitere Verlauf des hypothetischen Szenarios in der Simulation erprobt. Ein solches Vorgehen wird auch als „*silent testing*“ oder „*shadow mode*“ bezeichnet.

Als Referenzdatensätze werden dabei Datensätze bezeichnet, die konkrete Anforderungen und Einhaltung an Qualität erfüllen. Diese Datensätze sind beispielsweise mit problem- beziehungsweise aufgabenspezifischen Annotationen und Labels versehen, die entweder manuell über einen Domänenexperten, über hochwertige Referenzsensorik oder -algorithmik erzeugt wurden. Auch Annotationen und Labels simulativen Ursprungs können aufgrund eines validierten Sensormodells als Grundwahrheit angesehen werden. Diese Datensätze unterscheiden sich dabei durch die Aufnahmeposition selbst. So lassen sich nach [35] Daten aus der Fahrzeugsicht, stationärer oder mobiler intelligenter und vernetzter Infrastruktur als auch als Beobachtung Dritter, wie mobilen Drohnen, charakterisieren.

Die Nutzung von aufgezeichneten und zu Referenzdaten transformierten Datensätzen unterscheiden sich im Wesentlichen in den Anwendungsfällen der Bewertung und Abstraktion: Die Bewertung erlaubt Daten von niedriger Qualität, oder die anderweitig erfasst und in den Messraum der zu bewertenden Sensorsysteme abgebildet wurden, mittels entsprechenden Metriken zu bewerten. Die Abstraktion generalisiert Daten, um Modelle oder Modellparametrisierungen lernen zu können. Typischerweise findet dies über induktive Lernverfahren im Bereich des Maschinellen Lernens und somit als Teil von KI-Verfahren Anwendung.

## 2.4 Open Loop Entwicklungs- und Testmethoden

Datensatz und Autor	Szenarienbeschreibung	Sensordaten	Aufzeichnungsperspektive	Grundwahrheit / Annotation
HighD Dataset, ika RWTH Aachen [81]	Verkehrsflüsse entlang sechs Autobahnabschnitten um Köln, Deutschland	veredelte Trajektorien von 110.000 Fahrzeugen mit Manöverannotation (Folgen, Schwim-mend, Spurwechsel, ...), Straßeneigenschaften, Verkehrszeichen und Geschwindigkeitslimits	Drohnen	algorithmisch (neuronale Netze + Bayes'sche Glättung), Posi-tionsfehler um 10cm
Ko-PER Intersection Laserscanner and Video Dataset, Univer-sität Ulm [82]	Verkehrsteilnehmer (Fahr-zeuge, Fußgänger, LKW und Fahrrad-fahrende) in städt. Kreuzung Aschaffenburg	Laserscannernetzwerk und Kameras sowie Referenzdaten und Objektlabls	Infrastruktur	algorithmisch
INTERACTION Data-set, University of Cali-fornia, Berkeley & MI-NES ParisTECH & FZI [83]	Interaktive Fahrszenarien ver-schiedenen, internationalen, komplexen, kritischen Ver-kehrsszenarien mit Kreisver-kehr, nicht und signalisierter Kreuzung, Verkehrszusam-menschluss und Spurwechsel	HD Karte, Fahrzeug- und Fußgänger-, Fahr-radfahrertrajektorien	Drohnen und In-frastruktur	2D-BBs mit Objekt-IDs
TAF-BW Dataset, FZI [Zipfl et al., 2020, Fleck et al., 2020]	Urbane Kreuzungssituationen entlang der TAF Referenzstre-cke in Karlsruhe	Objektlisten und Trajek-torien mit LSA-Phasen (MAPEM/SPATEM) so-wie HD-Karte	Infrastruktur	algorithmische Verarbeitung und manuelle Prüfung
TUM Traffic Dataset [84, 85, 86]	Straßennetzwerk von annä-hernd 3.5 Kolimeter entlang der Autobahn A9	Kamera, LiDAR und Event-Kameras	Infrastruktur	manuelle (3D-BBs) und algo-rith. Annotation (2D-BBs)
Waymo Open Percep-tion Dataset [87, 88, 89]	Fahrten durch Phoenix, Mountain View und San Francisco, USA	5x LiDAR, 5 Kameras, 3D-Karten und Stre-ckendaten,	Fahrzeug	Annotation von 3D-BBs
nuScenes, Motional chemals Aptiv [90]	10 Szenen mit je 20sec, Fahrten in Boston und Singapur	synch. Multisensor-daten 1x LIDAR, 5x RADAR, 6x Kamera, IMU, GPS sowie detail-lierte Karten	Fahrzeug	3D-BBs mit Attributen durch Experten-Annotierer und nachgelagerter Validierung
Pedestrian Situated In-terent (PSI) [91, 92]	110 Fußgängerinteraktionen mit Ego-Fahrzeug und anno-tierten Absichten (unsicher, kreuzt, kreuzt nicht)	Kamera-Aufnahmen (Dashcam)	Fahrzeug	manuelle Bildan-notation von Fuß-gängerabsichten
DAIR-V2X, Institute for AI Industry Rese-arch (AIR), Tsinghua University [93, 94]	großflächige, multimodale, Wahrnehmung von Verkehrs-situationen aus verschiedenen Blickwinkeln	Kamera, LiDAR sowie fahrzeugseitig GPS/I-MU	Fahrzeug und In-frastruktur	3D-Annotierung durch Experten
MAN TruckScenes [95]	Autobahn (70 %), ländlich (10%), Terminal (10%), Tag/-Nacht, verschiedene Wetter-konstellationen	6x LiDAR, 6x Radar, 4x Kamera, 2x IMU, 1x GNSS	Fahrzeug	3D-BBs mit Objekt-IDs und Szenenlabels
DLR Urban Traffic Da-taset (DLR UT) [96]	31.405 Trajektorien von Ver-kehrsteilnehmern an der AIM-Forschungskreuzung in Braunschweig [97]	Trajektorien, LSA-Phasen, Wetter-, Luftqualitäts- und Straßenzustandsinfor-mationen	Infrastruktur	2D-BBs mit Objekt-IDs und Zeitstempel
DLR Highway Traffic Dataset (DLR HT) [98]	38.215 Trajektorien von Ver-kehrsteilnehmern der Auto-bahn A39 zwischen Wolfsbur-g/Königslutter und Cremlin-gen	Trajektorien, Wetter-, Luftqualitäts- und Straßenzustandsin-formationen sowie Verkehrsaufkommen	Infrastruktur	2D-BBs mit Objekt-IDs und Zeitstempel

Tabelle 2.1: Beispielhafte verfügbare Datensätze erfasster Verkehrsszenarien. Die meisten Datensätze zeichnen sich durch Grundwahrheit in Form von 3D-Bounding Boxen (3D-BB) Annotationen ab.

### 2.5 Closed Loop Entwicklungs- und Testmethoden

Das V-Modell dient „bei der Entwicklung eingebetteter Systeme [als] eines der häufigsten eingesetzten Referenzprozesse“ [99, S.2]. Es ordnet als Vorgehensmodell der Software-Entwicklung den Entwicklungsphasen entlang des linken Astes jeweils konkrete Testphasen entlang des rechten Astes zu. Teilsysteme, Komponenten und Module werden hierbei aus den Anforderungen top-down abgeleitet und die Testfälle bottom-up strukturiert [100]. Nach [101] lassen sich verschiedene Instanzen des X-in-the-loop (XIL) Paradigmas entlang des V-Modells verorten, siehe Abbildung 2.5. So werden diese schließlich innerhalb von Integrationsverbünden im Fahrzeug beim Hersteller getestet und mit der Zulassung und Homologation für den Produktionsbeginn (engl.: „*start of production*“, Abk.: SoP) freigegeben. Diesem folgend werden im Betrieb auf der Straße kontinuierlich Daten erfasst, Softwarekomponenten mit Updates versorgt und damit Nachbesserungen durchgeführt oder durch entsprechende Rückrufaktionen die Beseitigung von Produktmängeln an Fahrzeugen veranlasst. Insbesondere Updates und Nachbesserungen bei Fahrerassistenz- oder Hochautomatisierungsfunktionen bedingen eine entsprechende Revalidierung [102].

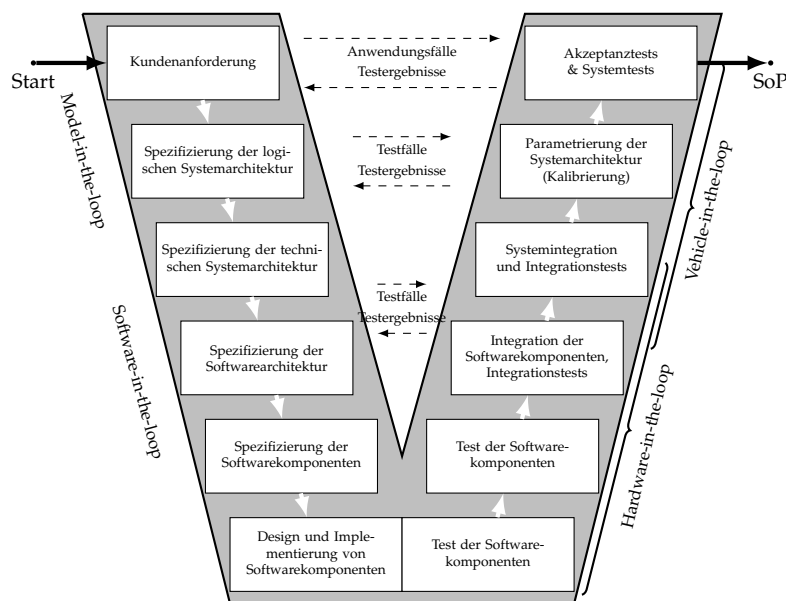


Abbildung 2.5: Verortung der X-in-the-loop Testmethoden entlang des V-Modells. Eigene Darstellung adaptiert nach [100, 101].

Die ursprünglich aus dem Fahrdynamiktest kommenden closed loop-Testverfahren werden dazu genutzt, die Reaktion eines zu testenden Systems wieder hinein in eine reale oder mittels Simulation virtuelle Umgebung zurückzuspielen, um das Verhalten des Systems in einem geschlossenen Wirkungskreis zu testen. Dabei wird ein zu testendes System oder eine zu testende Komponente in einen geschlossenen Regelkreis einer realen oder simulierten Verkehrsumgebung gesetzt, die entsprechend notwendige Eingangssignale für das zu testende System oder die Komponente bereithält.

Der Prüfling, auch als System-under-Test (SuT) oder Unit-under-Test (UUT) bezeichnet, wird in der vorliegenden Arbeit wie folgt definiert:



**Definition 5.** Ein **Prüfling** ist die innerhalb einer Bewertung zu betrachtende Komponente, Teilsystem oder gesamtheitlich hochautomatisierte Fahrfunktion.

Für die Einbettung des Prüflings in eine Testumgebung gibt es verschiedene Interpretationen und Definitionen des X-in-the-loop Paradigmas. So finden sich Definitionen, bei denen sich X auf die Testsysteminstanz von Model- über Hardware- bis Vehicle-in-the-loop oder aber auf die konkrete, zu testende Komponente bezieht, wie eine Servolenkung [103]. Für die Einbettung des Prüflings in ein closed loop-Testfahren stützt sich vorliegende Arbeit auf die Definition von Düser [32] wie folgt:



**Definition 6.** Beim **X-in-the-Loop-Framework** steht das „X“ jeweils für den zu untersuchenden Prüfling, die Unit Under Test (UUT). Diese kann eine einzelne Antriebsstrangkomponente, zum Beispiel eine Kupplung, ein Steuergeräte-Code oder ein komplettes Fahrzeug sein – jeweils real oder virtuell.

Dabei wird der zu untersuchende Prüfling in eine Restbussimulation eingesetzt, die die benötigten, vorhandenen aber typischerweise beim Test auf dem Fahrzeugkommunikationsbus fehlenden, Komponenten simuliert.

Die im V-Modell verorteten Testinstanzen des XIL-Ansatzes werden mit Ansätzen des Szenario-basierten Testens umgesetzt. Riedmaier vergleicht den Szenario-basierten Testansatz in [104] mit weiteren Absicherungsmethoden, wie dem „*Theorem Proving*“, der Erreichbarkeitsanalyse und Formalisierung von Verkehrsregeln sowie dem Ansatz der „*Correctness-by-construction*“.

Methoden zur formalen Verifikation stellen einen weiteren Ansatz der Absicherung dar. Sie sind bisher nur unter starken und einschneidenden Vereinfachungen und Annahmen über die Umwelt, in der das zu betrachtende System betrieben wird, anwendbar. Bei formalen Verfahren wird häufig eine vollständige Beobachtbarkeit der Verkehrssituationen angenommen. Die „*Multi-lane Spatial Logic*“ (MLSL) nach Schwammberger [105] stellt einen Formalismus der Kollisionsfreiheit auf mehrspurigen Autobahnen, sowie Kreuzungen, dar.

Einen weiteren Ansatz stellt das „*Responsibility Sensitive Safety*“ (RSS) nach Shalev-Shwartz [106] dar, welches starke Annahmen über die Entwicklung einer Verkehrssituation trifft. So listet Koopman in [107] Annahmen, die bei realen Verkehrssituationen durch RSS verletzt werden können, wie die Überschreitung der maximal angenommenen Bremsverzögerung durch das Führungsfahrzeug, einer plötzlich ändernden Straßenoberflächenreibung, das Unterschreiten der erwarteten Bremsfähigkeit oder auch ein Gerätefehler des Ego-Fahrzeugs.

### Szenario-basiertes Testen

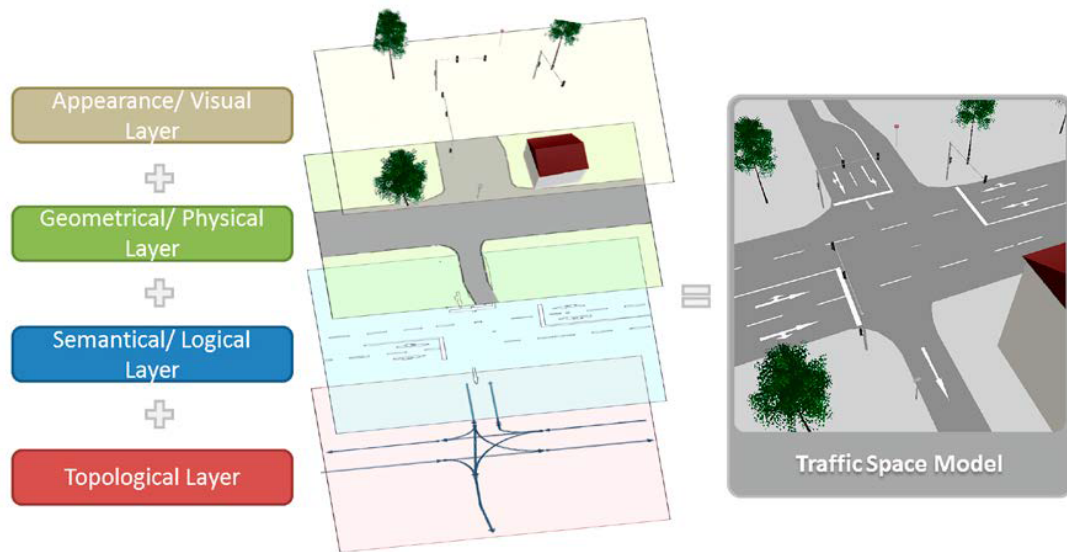
Szenario-basiertes Testen [108] verspricht einen einheitlichen, austauschbaren Ansatz zur Durchführung von Tests auf Basis allgemeinverständlicher Szenarienbeschreibungen. Die Szenarienformalisierung und Instantiierung ist dabei losgelöst von einer konkreten Testsysteminstanz innerhalb des XIL-Ansatzes.

Für die Formalisierung von Verkehrssituationen, deren räumlich-zeitlichen Entwicklung sowie der darin abgebildeten relativen Bezüge zwischen Objekten, bedarf es einer einheitlichen Strukturierung und Terminologie. Hierfür bietet der Stand der Technik verschiedene, teils aufeinander aufbauende Ansätze an, siehe folgende Abbildung 2.6. Ruhdorfer fokussiert auf die Verknüpfung von semantisch angereicherten 3D-Stadtmodellen mit Verkehrssimulationen und definiert hierfür in [109] ein sogenanntes Verkehrsraummodell, siehe Abbildung 2.6a. Dieses besteht aus einer topologischen Ebene zur Beschreibung des Straßenverlaufs als Netzwerkstruktur mit Knoten und Kanten, einer semantisch-logischen Ebene zur Beschreibung mit Straßentyp, Fahrtrichtung sowie Spurenanzahl, einer geometrisch-physikalischen Ebene über eine parametrische Darstellung, beispielsweise mittels Splines oder expliziten Grenzbereichs, und schließlich einem optischen Erscheinungsbild, wie mittels Farb- und Texturinformationen der Straße.

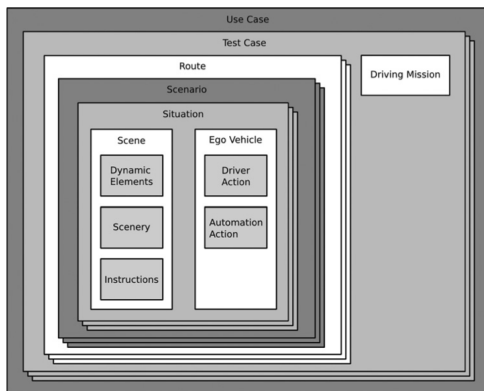
Einen ersten Ansatz einer Ontologie zur Beschreibung von Verkehrsszenarien wurde von Geyer in [110] vorgestellt, siehe auch Abbildung 2.6b. Diese wird über die Taxonomie von Ulbrich aus [111] erweitert, siehe Abbildung 2.6c. Nach Schuldt wird in [112] ein sogenanntes **4-Ebenenmodell**, motiviert von den Anforderungen eines Engstellenassistenten, siehe auch Abbildung 2.6d, vorgestellt: Die erste Schicht modelliert dabei geometrische, straßenzugbeschreibende Elemente wie Geraden und Kurven mit den entsprechenden straßentopologischen Bezügen untereinander. Situationsspezifische Anpassungen wie Baustellen werden in der zweiten Schicht des Modells gekapselt. Die darauffolgende, dritte Schicht modelliert die Szenendynamik mit den stationären und dynamischen Elementen, wie Hindernissen und bewegten Verkehrsteilnehmern. Schließlich modelliert die vierte Ebene die Umweltbedingungen, wie Tag- und Nachtwechsel, sowie unterschiedliche Wetterbedingungen.

Bagschik erweitert das Schichtenmodell in [113] auf ein **5-Schichtenmodell** unter Berücksichtigung von Autobahnszenarien, siehe Abbildung 2.6e: Während die ersten beiden Schichten bestehen bleiben, werden zeitabhängige, kurzfristige Anpassungen in einer neuen, dritten Schicht gebündelt, die für mehrtägige Zeiträume zu berücksichtigen sind. Die darauf folgende Schicht kapselt weiterhin Objekte, Manöver und Interaktionen, während die fünfte Schicht die Umweltbedingungen modelliert. Schließlich schlägt Sauerbier in [114] eine weitere Ebene zur Modellierung digitaler Information aus der Kommunikation und der digitalen Karte vor, siehe Abbildung 2.6f, welches als **6-Ebenenmodell** von Scholtes [115] ausdetailliert wird.

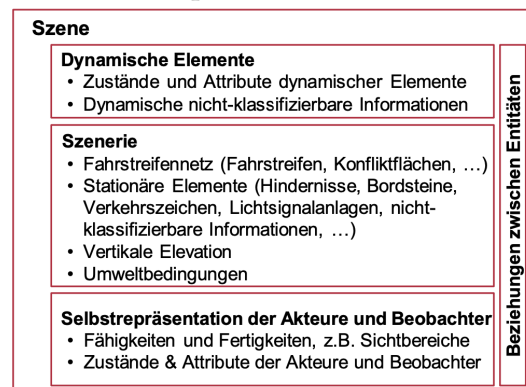
## 2.5 Closed Loop Entwicklungs- und Testmethoden



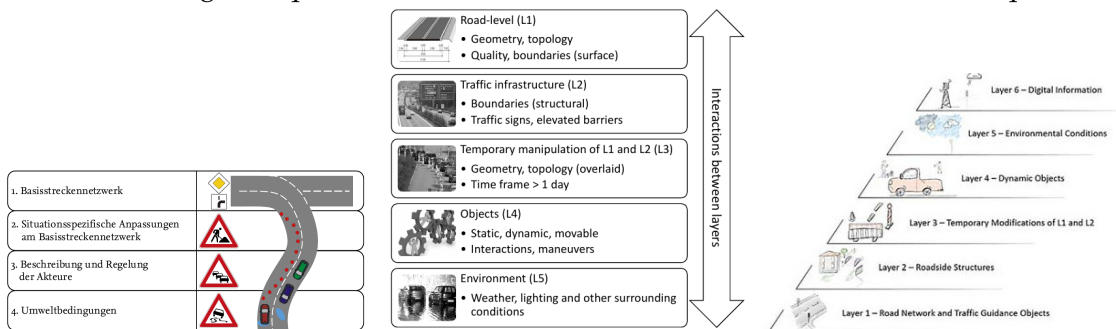
(a) Verkehrsraummodell nach Ruhdorfer. Bildquelle: [109]



(b) Ontologie zur Verkehrsszenenbeschreibung. Bildquelle: [110].



(c) Darstellung Begrifflichkeit Szene, Szenerie und Szenario. Bildquelle: [111].



(d) 4-Ebenenmodell nach Schuldt. Bildquelle: [112]. (e) 5-Ebenenmodell nach Bagschik. Bildquelle: [113]. (f) 6-Ebenenmodell nach Sauerbier [114]. Bildquelle: [115].

Abbildung 2.6: Taxonomien und Terminologie und Strukturierung von Verkehrsszenarien des szenarienbasierten Testens.

Die vorliegende Arbeit stützt sich im Wesentlichen auf die Begrifflichkeiten von Ulbrich et al. in [111], siehe auch Abbildung 2.6c.

Eine Szene ist wie folgt definiert:



**Definition 7.** Eine **Szene** beschreibt eine Momentaufnahme des Umfelds, welche die Szenerie, dynamische Elemente, die Selbstrepräsentation aller Akteure und Beobachter, wie auch die Verknüpfung dieser Entitäten umfasst. Einzig eine Szenenrepräsentation in einer simulierten Welt kann allumfassend sein (objektive Szene, Ground Truth).

Ein Szenario ist demnach wie folgt definiert:



**Definition 8.** Ein **Szenario** beschreibt die zeitliche Entwicklung von Szenenelementen innerhalb einer Folge von Szenen, welche mit einer Startszene beginnt. Aktionen und Ereignisse ebenso wie Ziele und Werte können spezifiziert werden, um diese zeitliche Entwicklung in einem Szenario festzulegen. Im Gegensatz zu Szenen decken Szenarien eine gewisse Zeitspanne ab.

Menzel [116] leitet auf den Begrifflichkeiten von Ulbrich und dem 6-Ebenenmodell [115] funktionale, logische und konkrete Szenarien ab. Diese ergeben sich schrittweise durch Konkretisierung der jeweils vorangegangenen Ebenen und unterscheiden sich daher im Grad der Detaillierung eines Szenarios. Diese Formalismen werden dann auf maschinenlesbare- und verarbeitbare Datenformate abgebildet, wie beispielsweise OpenCRG, OpenDRIVE und OpenSCENARIO. Diese unterliegen der Obhut der ASAM e. V. [117] zur Standardisierung und Weiterentwicklung. OpenCRG erlaubt die Modellierung von Straßenoberflächen mit hochgenauen Höhendaten und Oberflächeneigenschaften. OpenDRIVE wird für die komplementäre Modellierung von Straßennetzwerken verwendet. Schließlich ermöglicht OpenSCENARIO die Modellierung von Szenenabfolgen.

Der Stand der Wissenschaft bietet neben diesen - im Standardisierungsprozess befindlichen Formate - weitere Ansätze zur Modellierung von Verkehrsszenarien. Neben der Spline-basierten Modellierung von Straßen mittels OpenDRIVE, wurden parametrische Modellierungen, wie Lanelet1 (Llet1) [118] oder Lanelet2 (Llet2) [119], entwickelt. Weitere Straßenmodellierungen werden in [120] diskutiert. Einen frühen Ansatz zur Beschreibung und Formalisierung von Testszenarien stellt Berger in [121] vor. Aktuelle Entwicklungen stellen die domänenspezifische Sprache GeoScenario [122] der Universität Waterloo, die an der UC Berkeley entwickelte Sprache SCENIC [123, 124], sowie der Formalismus der Traffic Sequence Charts [125] dar.

Eine automatisierte Fahrfunktion wird in diesen Beschreibungssprachen definierten Szenarien in unterschiedlichen Instanzen des XIL<sup>2</sup> gegenübergestellt.

<sup>2</sup>Obwohl der Fokus im Folgenden auf closed loop-Tests in XIL-Instanzen liegt, sind ebenfalls open loop-Tests in unterschiedlichen Instanzen abbildbar.



In [126] wird ein Strukturierungsansatz der bestehenden XIL-Verfahren vorgestellt. Dieser führt eine Trennung der bisher starren Instanzen des XIL-Paradigmas herbei und ermöglicht daher einerseits eine detailliertere Betrachtung, Differenzierung sowie ebenfalls Kombination dieser. Die damit sich eröffnenden Kombinationen werden unter der Begrifflichkeit „Cyber-Physical Test Bench“ zusammengeführt. So werden Validierungssysteme charakterisierbar, die beispielsweise VIL mit angebundenem HiL oder auch „over the air“ Stimulation, wie mit einem Radarziel-Simulator [127], kombinieren.

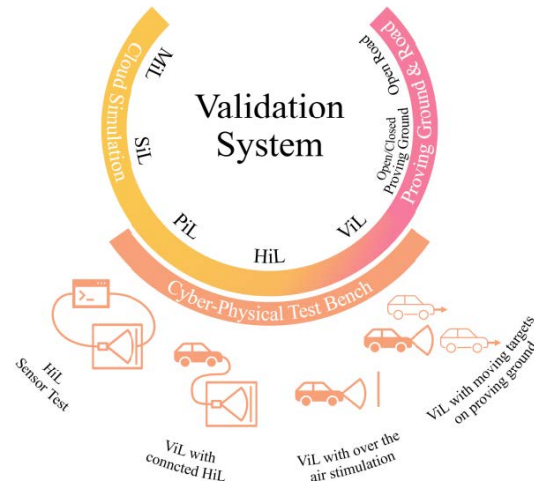


Abbildung 2.7: Strukturierung von Validierungssystemen [126].

### Model-in-the-loop

Innerhalb von Model-in-the-loop (MIL) Tests werden Modelle typischerweise mit einer Abbildung der Regelstrecke in einer Schleife getestet. Die hochautomatisierte Fahrfunktion als Verbund verschiedener Funktionen liegt dabei in Form eines Modells, wie beispielsweise eines block- und signalflussorientierten Modells in MathWorks MATLAB®, beziehungsweise Simulink®, vor. Nach [128] ergibt sich der Vorteil aus der modellbasierten Entwicklung hauptsächlich aus der Abstimmung und Konsolidierung über die Schnittstellen und Parameter der späteren funktionalen Bausteine, bevor die eigentliche Entwicklung der ADAS oder HAD verkörpernden Software startet. Damit kann parallel zur funktionalen Entwicklung ebenfalls die Entwicklung der Testfälle beginnen [128].

### Software-in-the-loop

Liegt der Prüfling als die zu testende Komponente in Serienscode, wie in C/C++, vor, so spricht man generell von Software-in-the-loop (SIL) [129]. Auch wenn MIL und SIL auf Office-Rechnern mit Entwicklungs- und Simulationsumgebungen, wie dem IPG CarMaker, Anwendung finden, so ergibt sich deren volles Potential innerhalb des Einsatzes in der Cloud und in Rechenzentren. Daher ist auch volle Flexibilität bei der Definition und Erstellung von Testszenarien gegeben, da Testsystem und Simulationsumgebung auf derselben Plattform laufen. So ist die Ausführungsgeschwindigkeit keinen Echtzeitbedingungen unterlegen. Virtuelle Testfahrten können bei verfügbarer Rechenkapazität in Cloud oder Rechen-

zentren mehrere Größenordnungen vielfacher Echtzeit durchsimuliert und sogar parallelisiert werden, was eine wesentlich höhere Testabdeckung ermöglicht.

### **Hardware-in-the-loop**

Testumgebungen nach dem Hardware-in-the-loop (HIL) Prinzip kommen zum Einsatz bei Algorithmen und funktionalen Komponenten, die bereits auf Steuergeräten integriert wurden. Diese Funktionen sind dabei typischerweise über mehrere Steuergeräte verteilt und werden daher einzeln wie auch in Verbünden erprobt. So wird in [130] beispielsweise zwischen Funktions- und Integrations-HIL unterschieden. Dabei werden Kommunikationsstrecken, wie beispielsweise über CAN oder auch das Timing zwischen verteilten Steuergeräte erprobt. Fehlende Komponenten werden durch geeignete Restbussimulationen ersetzt. Bisherige softwareseitige Schnittstellen werden dabei durch technische Schnittstellen der Steuergeräte ersetzt. Diese Tests sind dabei auf Echtzeit beschränkt und weniger flexibel als die eingangs erwähnten SIL-basierten Testumgebungen.

### **Von Driver- hin zu Human-in-the-loop**

In Driver-in-the-loop (DIL) Testumgebungen werden insbesondere ADAS, die in direkter Interaktion mit einem Fahrer stehen, getestet. Dabei werden Mensch-Maschine Schnittstellen, wie zur Übergabe der Fahraufgabe, erprobt und evaluiert. Typischerweise kommen hierfür statische wie auch dynamische Fahrsimulatoren, siehe auch [131], zum Einsatz, bei denen ein Proband in der Rolle des (Mit-)Fahrers in eine virtuelle Umgebung integriert wird. So wird in [132] ein statischer, einer Fahrkabine nachempfundener, Fahrsimulator als Referenzumgebung für Fahrerverhaltensstudien verwendet.

Für das Testen hochautomatisierter Fahrfunktionen ergibt sich mehr und mehr ein Übergang von Driver- bis hin zu Human-in-the-loop [133] Umgebungen, innerhalb deren der Mensch über verschiedene Rollen mit dem assistierten oder automatisierten Fahrzeug interagiert. Nicht mehr länger nur als Fahrer, sondern auch als verletzlicher Verkehrsteilnehmer, wie Fußgänger oder Fahrradfahrer. Auch neue Rollen, wie die in Deutschland mittlerweile gesetzlich geforderte technische Aufsicht, müssen bedacht werden, siehe [Gremmelmaier et al., 2022].

### **Vehicle-Hardware-in-the-loop**

Das von der „Netherlands Organisation for Applied Scientific Research“ (TNO) entwickelte Vehicle-Hardware-in-the-loop (VEHIL) Konzept [134, 135] stellt die nächst tiefere Integrationsstufe einer Fahrfunktion in ein Testsystem dar. Die Hardware und insbesondere Sensorik eines auf einem Rollenprüfstand integrierten

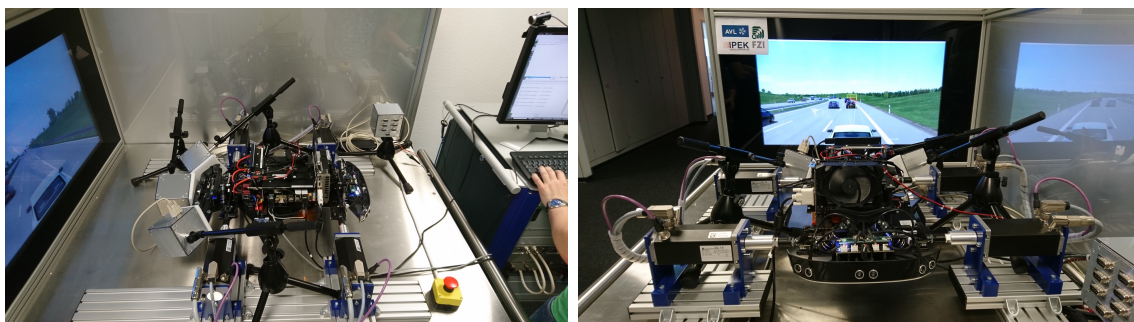
Fahrzeugs wird über sich als künstliche Ziele und um den Rollenprüfstand manövrierte Minifahrzeuge stimuliert. Allerdings sind diese Szenarien aufgrund der Fahrzeugfixierung auf einem Rollenprüfstand nur schwer adaptierbar und auf vielfältige Szenarien im urbanen Kontext nicht anwendbar. Nach [136] eignet sich dieses daher „vor allem zum sicheren Testen von Sensorik und Algorithmen“, ohne Berücksichtigung des Faktors Mensch.

### Vehicle-in-the-loop

Vehicle-in-the-loop (VIL) zeichnet sich als Testumgebung dadurch aus, dass die assistierende oder automatisierte Fahrfunktion im Verbund mit dem Fahrzeug und der Fahrdynamik getestet werden kann.

In der Fachliteratur findet man zwei grundlegende Konfigurationen der Testumgebung: Zum einen befindet sich das Fahrzeug auf einem Rollen- oder Antriebsstrangprüfstand, der mehr Flexibilität hinsichtlich der Abbildung der Lenkbarkeit [127] bietet. Exterozeptive Sensoren, wie Radar [137, 127], werden mittels dedizierten Stimulatoren über die Luft (engl.: „*over the air*“) stimuliert. Der in Abbildung 2.8 dargestellte Miniaturprüfstand ist in der Lage, über eine entsprechende Simulation die Ultraschallsensoren über die Luft zu stimulieren und somit die integrierte automatisierte Fahrfunktion des Miniaturfahrzeugs anzuregen. Zum anderen kann das Fahrzeug auf einer freien Teststrecke bewegt werden. [138, 139] und [Schwab et al., 2014] zeigen auf, wie sich assistierende oder automatisierte Fahrfunktionen mittels virtueller Objektlisten aus parallel laufenden Simulationen closed loop anregen lassen. In [140, 141, 136] wird diese Testumgebung insbesondere vor dem Hintergrund der Integration eines potentiellen Fahrers in die Testschleife erforscht.

So beschäftigen sich aktuelle Arbeiten mit der Aussagefähigkeit der VIL-Tests [104], wie auch generellen Weiterentwicklungen der Methodik [142, 143] und werden in der Forschung zur praktischen Erforschung und Entwicklung von Fahrfunktionen, wie von Platooning-Funktionen [144], angewendet.



(a) Seitenansicht des Prüfstands.

(b) Rückansicht des Prüfstands.

Abbildung 2.8: Miniaturfahrzeug des Audi Autonomous Driving Cups auf Prüfstand. Mit freundlicher Genehmigung von R. Hettel.

### Erprobung auf Teststrecken und Prüfgeländen

Im Entwicklungsprozess schließt sich typischerweise die Erprobung auf Teststrecken, beziehungsweise Prüfgeländen (engl.: „*test track*“ oder „*proving ground*“), an die Labortests an. Auch werden in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses sogenannte *Rapid Prototyping* Systeme innerhalb der Erprobung auf Testgeländen für die frühe Bewertung und Ableitung von Erkenntnissen für die Systemauslegung von Fahrfunktionen genutzt. Die Erprobung auf Prüfgeländen wird typischerweise mit speziell ausgebildeten Testfahrern durchgeführt und kann aus einem Kontrollzentrum heraus beobachtet und unterstützt werden, siehe [145, 146]. Prüfgelände sind ursprünglich aus dem Bereich der Fahrdynamik bekannt und werden immer mehr für die Anforderungen umgebungswahrnehmender und -interpretierender Automatisierungsfunktionen angepasst. Bereits 2003 wurde in [145] über den Aufbau eines sogenannten „*digital automobile proving ground*“ (DAPG) für Fahrtests automatisierter Fahrzeuge einer amerikanisch-chinesischen Zusammenarbeit berichtet.

Prüfgelände werden typischerweise für genormte Fahrmanöver-Tests [69], wie den ISO Spurwechsel- oder VDA e.V.-Ausweichtest nach ISO3888 [147], oder auch Verbrauchertests, wie EuroNCAP, verwendet. EuroNCAP Tests zeichnen sich dadurch aus, dass sie „grundsätzlich ohne fahrzeughersteller- oder -systemherstellerspezifisches Wissen durchführbar sein müssen“ [148, S. 172]. Diese Art von Tests stellen damit starre Testabläufe für einzelne Fahrerassistenz- ([149]) oder auch Fußgänger-Schutzfunktionen [150] dar, die mit Testwerkzeugen, wie Zielfahrzeugen oder Dummies durchgeführt werden, deren Bewegungssystem die für den Test jeweils notwendige Wiederholbarkeit erreicht [148].

Zielfahrzeuge und Fußgänger-Dummies [151] werden typischerweise über Brückenkonstruktionen, Schlittenzüge oder auch riemengetriebene Mechaniken manövriert [148]. Abbildung 2.9a zeigt einen einem Dummy in Kindgröße mit entsprechender Freigabemechanik. So beschäftigt sich die Arbeit von Doric in [152] mit einer mechanischen Konstruktion, die das typische, bei einer Kurvenfahrt auftretende Neigungsverhalten eines Fahrradfahrenden abbildet. Weiterhin können Fahrmanöver mittels mittel über Automatisierungsroboter ausgestatteter Fahrzeuge erprobt werden [146]. Weitere technische Aufbauten, wie beispielsweise das mobile Regensimulationssystem *SprayMaker* [153], ermöglichen die Nachbildung von Wetter- und Regeneffekten.

Die Erprobungen auf Testgeländen zeichnen sich durch eine hohe Wiederholbarkeit, Kontrollierbarkeit und Beobachtbarkeit aus. Potentiell auftretende Gefährdungen und Risiken beziehen sich damit zumeist auf die für den Test verwendete Hardware, die beteiligten Erprobungsfahrer und sind somit abschätzbar. Dem gegenüber stehen aber diverse Nachteile: Die für die Szenarienerstellung und Testdurchführung notwendige Steuerungs- und Messtechnik, wie auch der benötigte Personaleinsatz, sind aufwendig und kostenintensiv. Die Gestaltungsfreiheiten und die Flexibilität hinsichtlich der abzubildenden Szenarien unterliegt der bestehenden Streckenführung und baulichen Gegebenheiten entlang dieser





(a) Dummy-Konstruktion eines Kinderrutschfahrzeuges.



(b) Außensicht auf Testgeschehen.



(c) Sensorsicht auf Testgeschehen.

Abbildung 2.9: Exposition von Testszenarien auf Prüfgeländen mittels Zielobjekten.

Strecke. Es besteht daher kaum Möglichkeit, verschiedene, innerstädtische Szenarien im Sinne von Kreuzungen, Quartierstraßen und baulichen Gegebenheiten zu variieren, da zusätzlich auch Umgebungsfaktoren, wie Gebäude oder Straßenbegleitgrün, berücksichtigt werden muss. Beim Einsatz mechanischer Konstruktionen, wie Zielfahrzeugen oder Dummies, werden die Sensoren des Fahrzeugs zwar direkt über die Zielgegenstände stimuliert, dennoch müssen deren Oberflächeneigenschaften für diese sensorielle Erfassung genügend akkurat abgebildet sein und unterliegen wiederum mit ihren Bewegungssystemen dynamischen und regelungstechnischen Einschränkungen. Daher beschränken sich die durchführbaren Szenarien bisher zumeist auf eingangs erwähnte Tests.

Aktuelle Forschungsarbeiten beschäftigen sich in [154] mit der Bedarfsanalyse der digitalen Zwillinge, der Priorisierung von Infrastruktur-Investments auf diesen [155], wie auch deren Bewertung vor dem Hintergrund der algorithmischen Abbildbarkeit von Szenarien auf den vorliegenden Straßenführungen [156, 157].

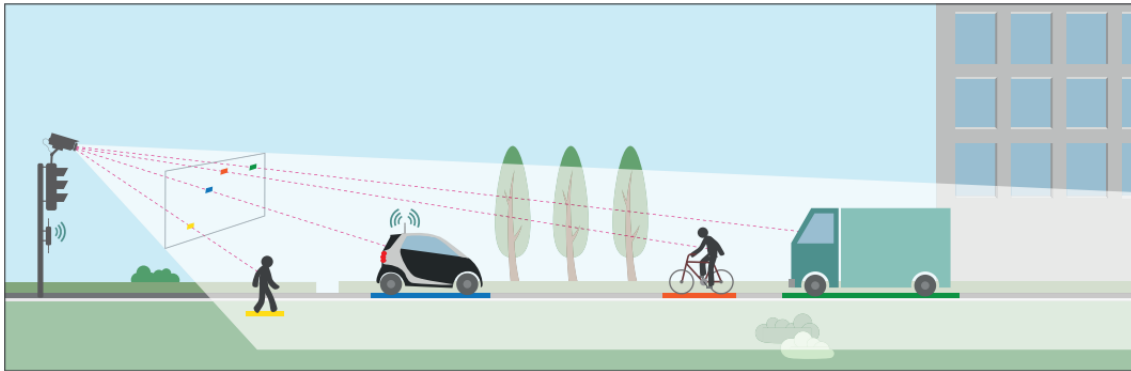
### Erprobung auf Testfeldern des öffentlichen Raums

Viele Testfelder bieten intelligente und vernetzte Straßenverkehrsinfrastrukturen im öffentlichen Straßenraum. Diese, auch als digitale Testfelder bezeichneten, Testumgebungen [158] sollen die Erprobung automatisierten, vernetzten oder auch Infrastruktur-unterstützten Fahrens im öffentlichen Straßenraum unter realen Einflüssen ermöglichen, siehe auch Abbildung 2.10a. Sie werden zumeist von Konsortien aus Städten, Kommunen, Wirtschaft und Wissenschaft im Rahmen von Forschungsprojekten auf- und ausgebaut. Als wesentlicher Baustein dienen hierfür intelligente und vernetzte, straßenseitige Infrastrukturen, um das vorherrschende Verkehrsgeschehen kontinuierlich zu erfassen und höherwertige Messgrößen, wie Trajektorien, Interaktionen, Grenzfälle oder Beinahe-Unfälle, zu identifizieren und zu annotieren. Den Kosten-Nutzen für automatisierte Fahrzeuge mit der Unterstützung der smarten Verkehrsinfrastrukturen stellt Österle in [Österle et al., 2022] gegenüber der reinen fahrzeugseitigen Automatisierung heraus. Rehme stellt in [159] Werkzeuge für Kommunen hinsichtlich der hierfür notwendigen V2X-Infrastrukturplanung vor.

Diverse Publikationen wie [160, 161, 158, 162, 163] listen und vergleichen Testfelder untereinander nach Attributen wie Streckentypen und -längen, verfügbaren Sensoren, Kommunikationsfähigkeiten und der Systemarchitektur der digitalen Infrastruktur. Eine umfangreiche Darstellung und einen Vergleich von vernetzten Straßenverkehrsinfrastrukturen gibt Creß in [163]. Testfelder adressieren dabei zumeist unterschiedliche Straßentypen und damit Verkehrsszenarien. So sollen das *Digitale Testfeld A9* [164] auf der Bundesautobahn A9 oder auch das *Testfeld Niedersachsen für automatisierte und vernetzte Mobilität* die Erprobung des vernetzten wie auch automatisierten Fahrens ermöglichen. Städtische, urbane Umgebungen werden beispielsweise mit der Forschungskreuzung Aschaffenburg [82, 165] oder mit den straßenzugbegleitenden Infrastrukturen der *Anwendungsplattform Intelligente Mobilität* (AIM) in Braunschweig oder des Testfeld Autonomes Fahren Baden-Württemberg in Karlsruhe [Fleck et al., 2018] adressiert.

Testfelder zeichnen sich zumeist durch eine Digitalisierung der beinhalteten Streckenzüge mittels hochgenauer Kartierung für HD-Karten aus. Dieses Wissen wird dann mit Echtzeitinformationen aus der verkehrsseitigen Sensorik ergänzt. Neben dieser umfasst die digitale Infrastruktur als Schlüsselemente ebenfalls die zur Verfügung stehenden Rechner-, Backend- und Kommunikationskomponenten [Fleck et al., 2022, 166]. Die Kartierung zu hochgenauen Karten, sowie die Erfassung der Referenzdaten soll dabei die Entwicklung von hochautomatisierten Fahrfunktionen innerhalb verschiedener Phasen der Entwicklung unterstützen. Hierfür werden auch mobile Verkehrsinfrastrukturen eingesetzt, wie in Abbildungen 2.10b und 2.10c dargestellt.

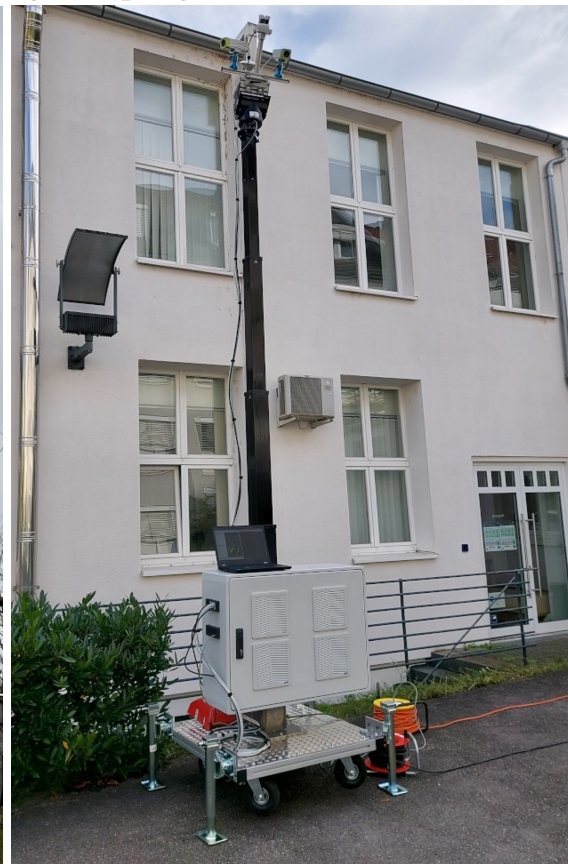
Die in den Testfeldern anfallenden Daten können mittels der Onboard-Systeme der Fahrzeuge durch die Datenerfassung in Echtzeit bewertet werden, die erfassten Daten können aber auch zu frühen Entwicklungsphasen, zur Abstraktion und Erstellung von Verkehrs- und Szenarienmodellen, verwendet werden.



(a) Konzeptdarstellung des TAF-BW: Das Verhalten autonomer Fahrzeuge wird über intelligente und vernetzte Infrastruktur als Referenzdaten erfasst. Bildquelle: [Fleck et al., 2018]. Mit freundlicher Genehmigung von Springer Nature.



(b) Mobile Sensoreinheit des Testfelds TAF-Niedersachsen. Bildquelle: Eigene Fotografie.



(c) Mobile Sensoreinheit des Testfelds TAF-BW. Bildquelle: [Fleck et al., 2022] © 2022 IEEE.

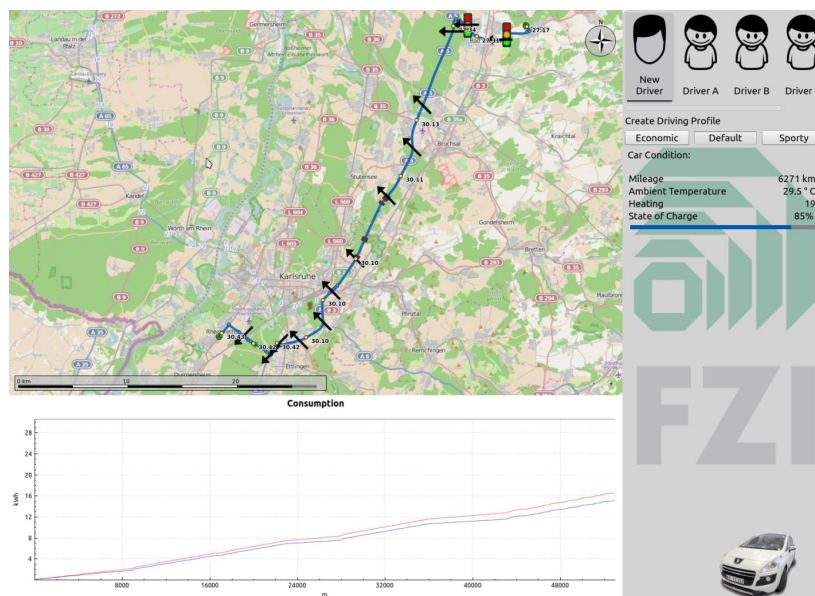
Abbildung 2.10: Konzept und Umsetzungsbeispiele mobiler, smarter Referenzinfrastruktur zur flexiblen Erfassung von Verkehrssituationen.



### Erprobung im realen Fahrversuch

Schließlich findet die Validierung im öffentlichen Straßenverkehr unter zufälligen, bewusst unvorhersehbaren und unkontrollierbaren Einflüssen der erlebbaren Verkehrsumgebung statt. So verweist Sax in [99, S.10] darauf, dass eine „noch so gute Umgebungssimulation beim Steuergerätetest beim Prüfstand nicht identisch mit der Kombinatorik und Zufälligkeit einer realen Situation im Fahrzeug [sei]“ und betont gleichermaßen, dass im Fahrzeug selbst anstelle des Testens lediglich ein Erproben möglich sei. Die Erkennung oder der Rückschluss von Fehlern auf Funktionsebene, Kosten für die Durchführung von Fahrzeughardware, Messtechnik sowie Personal sind weitere Herausforderungen. So ist eine nachgelagerte Analyse und Reproduzierbarkeit der mit einer potentiellen Fehlfunktion erlebten Situation – beispielsweise unter Nutzung genannter open loop-Methoden – unerlässlich, aber aufwendig.

Zur effizienten und effektiven Durchführung dieser Fahrten werden Strecken vorab detailliert analysiert und geeignete Routen auf ihre Herausforderungen bestimmt [167, Donn et al., 2015]. Abbildung 2.11 zeigt ein im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickeltes Planungstool zur Erprobung eines E-Mobilitätsassistentensystems unter Berücksichtigung von Wetter und LSAs. Im europäischen Umfeld fanden in der Vergangenheit Erprobungen insbesondere auf Messkampagnen und Demonstrationsfahrten, wie der *Bertha Benz Fahrt* [18] oder der *Overland 13 Fahrt* zwischen Parma und Shanghai [168] statt. Dem steht die Herangehensweise amerikanischer Firmen wie WAYMO [169] oder TESLA [170] gegenüber, die intensiv und offensiv mittels Fahrzeugflotten im realen Verkehr erproben, und somit Erfahrungen, insbesondere aber Grenzfälle einfahren [170].





## Bewertender Vergleich

Testumgebungen können nach verschiedenen Gesichtspunkten verglichen werden. So vergleicht [102] den *Shadow Mode*, das *Functional Real World Testing* und die *Simulation* nach zwölf Bewertungskriterien, die sich im Wesentlichen an technologischen, sicherheitsrelevanten und kostenbezogenen Eigenschaften orientieren. In Tabelle 2.2 wird eine Bewertung der bisher vorgestellten Testumgebungen auf Basis der Kriterien aus [171, 172, 173] und weiteren vorgenommen.

Nilsson [172] führt folgende Kriterien auf: Die **Wiederholbarkeit** (engl.: „*repeatability*“) gibt an, dass ein Experiment bei wiederholter Durchführung ohne Änderung von Messsystem und Bediener dasselbe Ergebnis liefert. Die **Reproduzierbarkeit** (engl.: „*reproducability*“) ist die Fähigkeit, wiederholbare Ergebnisse zu liefern, unabhängig davon, welcher Bediener oder Messaufbau genutzt wird.

Die **Kontrollierbarkeit** (engl.: „*controllability*“) eines Experiments [173, 174] bezeichnet die Fähigkeit, einen Initial- oder Arbeitszustand eines Prüflings herzustellen. Nilsson [172] bezieht dieses als „*process controllability*“ bezeichnete Kriterium auf Wetterumstände, Objektdynamiken oder auch Szenarien. Im vorliegenden Fall wird die Definition auf die Exposition von Szenarien (urbane Kreuzung), Verhalten zur Erzeugung kritischer (Beinahe-)Unfälle oder ganzer räumlicher Szenen (innerstädt. Kreuzung) ausgeweitet. Die **Beobachtbarkeit** (engl.: „*observability*“) bezeichnet die Fähigkeit zu identifizieren, ob ein Test bestanden wurde oder gescheitert ist [173, 174]. Nilsson [172] definiert das Kriterium als **Grundwahrheit** (engl.: „*ground truth*“) in einem weiteren Sinne: Er schließt ebenfalls die Kenntnis über das „wahre“ vorliegende Szenario mit dem umgebenen Verkehrsteilnehmerverhalten, den tatsächlichen Sensor- und Regelungsparameter des betrachteten Fahrzeugs mit ein.

Testsysteme können hinsichtlich ihrer **Echtzeitbeschränkung** charakterisiert werden. Werden reale Komponenten mit Steuergeräten oder Menschen im Verbund erprobt, sind Tests auf eine Durchführung in Echtzeit beschränkt. Anderenfalls können Tests auch in vielfacher Echtzeit durchgeführt, insbesondere aber auch parallelisiert werden. Die **Sicherheit** (engl.: „*safety*“) eines Experiments, siehe auch [171], charakterisiert die Fähigkeit des Testsystems, für Mensch und/oder Fahrzeug kritische Szenarien gefahrenfrei durchführbar zu gestalten. Dies gilt für ein etwaiges, unerwartetes Fehlschlagen der Experimente, wie auch Durchführung bewusst konstruierter kritischer Szenarien. Die **Vollständigkeit** (engl.: „*coverage*“) bezieht sich auf die Abdeckung des Prüflings in Bezug auf das automatisierte Fahrzeug als Ganzes. Der Prüfling kann dabei, wie bei SIL, lediglich das ADAS oder HAD-System, wie bei VEIL die reale Sensorik oder wie bei der Realerprobung das gesamte Fahrzeug miteinschließen. Dies entspricht dem Kriterium der „Validierung entlang der gesamten Wirkkette“ aus [102]. Die **Glaubwürdigkeit** (engl.: „*credibility*“) der Ergebnisse wird in der vorliegenden Arbeit definiert als eine möglichst umfangreiche Abdeckung der Umgebungsparameter bei gleichzeitiger Kontrollier- und Beobachtbarkeit der Szenarien hinsichtlich ODD und HAD (vergleichbar zur „Realitätsnähe der Ergebnisse“ nach [171]).

	Model-in-the-loop	Software-in-the-loop	Hardware-in-the-loop	Driver-in-the-loop	Vehicle-Hardware-in-the-loop	Vehicle-in-the-loop	Erprobung auf Prüfge-länden	Erprobung auf öffentl. Testfeldern	Erprobung im realen Fahrversuch
Wiederhol- und Reproduzierbarkeit	+	+	+	+	+	0	0	–	–
Kontrollierbarkeit	+	+	+	+	+	+	0	–	–
Beobachtbarkeit	+	+	+	+	+	+	+	+	–
Echtzeitunbeschränkung	+	+	–	–	–	–	–	–	–
Sicherheit	+	+	+	+	+	+	0	–	–
Vollständigkeit	–	–	–	–	0	0/+	+	+	+
Glaubwürdigkeit	–	–	–	–	–	0/+	+	+	+

Tabelle 2.2: Relativer Vergleich verschiedener Testumgebungen. Aufgrund schwer bezifferbarer Verhältnisse der unterschiedlichen Kriterien wird eine Ordinalskala mit den Merkmalsausprägungen positiv (+), neutral (0) und negativ (–) gewählt. Bei Kriterien mit zwei Ausprägungen (0/+) wird generell durch einen Aufbau auf einem Prüfstand und der freien Fahrt auf einer Teststrecke oder Prüfgelände unterschieden. In der vorliegenden Arbeit werden methodische Konzepte der VIL-Methodik innerhalb der Anwendung auf Prüfgeländen, sowie zur Erprobung in Testfeldern des öffentlichen Verkehrs erarbeitet, um Vorteile einer virtuellen Validierung und Realerprobung zusammenfließen zu lassen.

## 2.6 Modellbildung und Simulation

Simulationen sind ein wesentlicher Bestandteil zur Einbettung und Anregung erweiterter Fahrerassistenzsysteme wie auch automatisierter Fahrfunktionen als Prüflinge in die eben erläuterten Testsystemarchitekturen. Diese, respektive die darin miteinander gekoppelten Modelle, stellen einzuspeisende Erregungen in Form von Signalen für den Prüfling über eine reaktive Umgebung, die Aspekte des späteren Arbeitsraumes des Verkehrs abbildet, bereit. Neben der Anwendung für die Validierung und Verifikation sind weitere Ziele die Datengenerierung für die Testevaluation und das Erzeugen von Lerndaten für KI-basierte Funktionen.

Die vorliegende Arbeit stützt sich auf die Definition der Simulation nach der VDI e. V.-Richtlinie 3633 [175]:



**Definition 9.** Die **Simulation** ist die Nachbildung eines dynamischen Prozesses in einem Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.

Auf Basis beliebiger oder der Realität nachempfundener Straßenführungen werden komplexe Verkehrsszenarien mit Markierungen, Verkehrsschildern wie auch Lichtsignalanlagen konstruiert. Dazu gehören Gebäude, Straßenbegleitgrün und weitere beispielsweise Verdeckung bewirkende Elemente hinzu. Diese statische Umgebung wird dann mit Verkehrsteilnehmern unterschiedlicher Bewegungsarten, wie Fußgängern, Fahrradfahrern und weiteren Fahrzeugen angereichert. Schließlich können Modelle wetter- wie auch atmosphärisch bedingter Effekte Anwendung finden. So fokussiert [176] auf mit Geoinformationssystemen gekoppelte Verkehrssimulationen, um reale Straßenkarten als Grundlage von Verkehrssystemen zu nutzen.

Um eine automatisierte Fahrfunktion als Prüfling einzubinden, wird ebenfalls ein Dynamikmodell des Eigenfahrzeugs mit entsprechenden Restbusmodellen benötigt. Diese finden Anwendung, wenn nicht alle Sensoren, Aktoren oder Steuergeräte in der Testsystemarchitektur als Fahrzeugbusteilnehmer vorhanden sind und beispielsweise Aktivierungssignale [177] einzuspeisen sind. Besonderer Fokus gilt dabei den einzusetzenden Sensormodellen als Schnittstelle zu den zu testenden erweiterten Assistenz- oder hochautomatisierten Fahrfunktionen. Diese sind hinsichtlich ihrer Eigenschaften, wie ihrer Bildung (probabilistisch, physikalisch oder phenomonologisch), Darstellungstreue, Auflösung und weiterer immer im Verbund den in der Simulation befindlichen Umgebungs-, Wetter- und Atmosphäreneffektmodellen zu bewerten. Dies gilt sowohl für umgebungswahnehmende, exterozeptive Sensoren, die die Umgebung abtasten und diskretisieren wie auch propriozeptive Sensoren, die eine Eigenzustandsgröße des Fahrzeugs bemessen.

### Simulationsumgebungen

Das Werkzeug einer Simulationsumgebung erlaubt die Integration und Verschaltung verschiedener Domänenexpertenmodelle zur gesamtheitlichen Bedatung und Parametrierung und damit Abbildung von Verkehrssituationen zur letztendlichen Einbettung der Prüflinge. Zahlreiche dieser Simulationsumgebungen wurden in der letzten Dekade im industriellen und akademischen Umfeld entwickelt und bewertet [178].

Zahlreiche Übersichtspublikationen widmen sich der Anforderungsanalyse und dem Vergleich dieser Simulationsumgebungen: Der technische Bericht „The State of Modeling, Simulation, and Data Utilization within Industry: An Autonomous Vehicle Perspective“ von Fadaie [179] sowie die Studien „A Survey on Simulators for Testing Self-Driving Cars“ von Kaur et al. [180] und „Survey on Autonomous Vehicle Simulation Platforms“ von Yang et al. [181] zielen auf die benannte Anforderungsanalyse und den Vergleich bestehender Simulationsumgebungen ab. Die ausführliche Analyse in „Test Your Self-Driving Algorithm: An Overview of Publicly Available Driving Datasets and Virtual Testing Environments“ nach [72] stellt 36 Datensätze und 21 Simulationsumgebungen für das closed loop-Testen heraus. Weitere Übersichtsdarstellungen stellen beispielsweise Simulationsmethoden und -umgebungen in den Kontext der Modellbildung und alternativer Bewertungsmethoden, wie Alghodhaifi [182], oder auch hinsichtlich verwendeter Modelle, Datenstandard- und Toolkompatibilitäten, siehe auch [183].

So vergleicht der eingangs erwähnte technische Bericht von Fadaie [179] die Fähigkeiten von Simulationsumgebungen insbesondere industrieller Stakeholder wie WAMO's Carcraft oder auch NVIDIA Drive SIM mit weiteren Open Source Ansätzen, wie CARLA [184] oder MICROSOFT AirSim [185]. In der Studie von Yang [181] werden aktuelle Ansätze von Simulationsumgebungen hinsichtlich ihrer abgebildeten Grundbestandteilmodelle zerlegt und dabei fünf wesentliche Bestandteile identifiziert: die statische Umgebungsmodellierung, die dynamische Umgebung und ihr Verhalten, die Verkehrsflusssimulation und die Sensorsimulation. Weiterhin werden die Simulationsumgebungen in Punktkarten und 3D-Engine basierte Umgebungen unterschieden und exemplarisch SimMobilityST [186], DLR SUMO [187], MICROSOFT Airsim, mit den kommerziellen Umgebungen IPG CarMaker und SIEMENS PreScan verglichen.

Die veröffentlichte Überblick nach Kaur [180] schlüsselt Anforderungen an Simulationsumgebungen für ADAS und HAD auf und vergleicht diese für konkrete Umgebungen tabellarisch. Die Autoren formulieren die generelle Anforderung, dass eine ideale Simulationsumgebung sich möglichst nah an der Realität zu orientieren habe und daher eine Balance zwischen Fahrdynamiksimulation und der Darstellung der virtuellen 3D-Umgebung notwendig sei. Dabei werden beispielsweise CARLA und LGSVL [188], MathWorks MATLAB® / Simulink® und der generischen, aus dem Bereich der Robotik stammende Simulationsumgebung Gazebo Sim [189] gegenübergestellt.

Zahlreiche dieser Simulationsumgebungen integrieren bereits Verkehrsteilnehmer-verhaltensmodelle. Nach [176, S. 17] betrachten makroskopische Verhaltensmodelle Verkehr zumeist „mit Hilfe von Flüssigkeitsmodellen oder gaskinetischen Gleichungen“, wohingegen mikroskopische Verhaltensmodelle einen Verkehrsteilnehmer als Individuum betrachten. Beide Ebenen können auch entsprechend gekoppelt werden, siehe [190]. Modelle, wie das (erweiterte) IDM [191, 192], stellen das Verhalten motorisierter Verkehrsteilnehmer in Form kombinierter Fahrer-Fahrzeug Verhaltensmodelle dar. Auch für das Verhalten von Fußgänger und Fußgängergruppen werden Modelle entwickelt, siehe auch [193, 194], und in diese Simulationsumgebungen integriert [Zofka et al., 2022].

### KI-basierte Modellbildung und Simulation

Ein – während der Verfassung der vorliegenden Schrift – aufkommender Forschungszweig hat sich mit der Modellbildung und Re-Simulation mittels Generativer KI beschäftigt. Der Diskrepanz zwischen heutigen, zumeist auf Expertenwissen basierenden Modellen und der Realität, wird dabei versucht durch Nutzung von Verfahren der Künstlichen Intelligenz und des Maschinellen Lernens entgegenzuwirken. Dies gilt insbesondere für die Abbildung von Umgebungs-, Sensor- und Verhaltensaspekten. Vorteil dieser Ansätze ist dabei zumeist, dass anstelle von domänenspezifischem Expertenwissen zur Modellbildung auf Beobachtungen aus der Realität zurückgegriffen wird. Diesen Ansätzen liegen häufig generative Methoden, wie auf Basis tiefer, faltender, neuronaler Netze (CNN), Neural Radiance Fields (NeRF), Generative Adversarial Network (GAN) oder auch Variational Autoencoder (VAE), zugrunde. Folgend werden wesentliche Arbeiten aus dem Stand der Technik dargestellt, die im Rahmen des Survey [Muettsch et al., 2023] konsolidiert wurden. Diese Einordnung unterteilt die datengetriebene Ansätze zur Abbildung von Verkehrsaspekten in inhalts-, verhaltens- sowie wahrnehmungsbezogenen Realismus.

#### Inhaltsbezogener Realismus

Der inhaltsbezogene Realismus bezieht sich auf die Plausibilität verschiedener Aspekte einer Verkehrsszene, wie beispielsweise die Straßenführung, die Verkehrsszene und -umgebung, wie auch die Repräsentation oder Darstellung von Objekten selbst. Beispiele für prozedurale Ansätze sind beispielsweise PGDrive [195] oder auch StreetGAN [196]. Während innerhalb PGDrive ganze Straßenzüge mittels einiger vordefinierter Straßengrundelemente erstellt werden, nutzt StreetGAN Kartenmaterial selbst, um Graph-basierte Straßenmodelle prozedural zu erstellen. Während MIT VISTA [197] bereits RGB-Bilder aus neuen Blickwinkeln um die ursprünglich im Datensatz abgefahrte Trajektorie generiert, generalisiert MIT VISTA 2.0 [198] auf Lidar- und Event-basierter Sensorik. Um aus Daten neue Blickwinkel auf Umgebungen und Objekte abzubilden, finden ebenfalls Neural Radiance Fields (NeRF) [199, 200] Anwendung, unter anderem für

Luftaufnahmen städtischer Szenen in [201] und für verkehrliche Szenen durch WAYMO in [202]. DriveGAN [203] nutzt als neuraler Simulator hierfür VAEs mit GANs. WAYVE hat ebenfalls erste Ergebnisse des Ghost Gym, einem datengetriebenen, neuronalen Simulator unter [204] veröffentlicht, konkrete technische und methodische Details stehen aber noch aus.

Neben eben genannten Modellierungen und Simulatoren gibt es ebenfalls Ansätze, die direkt abstrakte Modellierungen wie Szenengraphen erstellen und daher fortführende Sensormodelle benötigen. Hierbei sind MetaSim2 [205], Sim2SG [206] und SceneGen [207] zu nennen. Weitere Verfahren, die das Aussehen von Objekten erlernen, stellen GET3D [208], welches aus Bildern texturierte 3D-Modelle inferiert oder NVIDIA Magic3D [209] dar.

### Verhaltensbezogener Realismus

Verhaltensbezogene KI-Modelle abstrahieren und reproduzieren Verhalten von Verkehrsteilnehmern in Simulationen. [210] unterscheidet hierbei zwischen datengetriebenen, gegnerisch-getriebenen (adversarial) sowie wissensangeleiteten Verfahren im Sinne des semi-überwachten Lernens.

Der datengetriebene Algorithmus TrafficGen nach Feng [211] zeigt einen generativen Ansatz zur Generierung von Verkehrsflüssen aus aufgezeichneten Fahrten auf Basis eines auto-regressiven, generativen Modells mit einer Encoder-Decoder Architektur auf. Klischat [212] erstellt mittels eines evolutionären Algorithmus kritische Szenarien, die den Lösungsraum des automatisierten Fahrzeuges minimieren sollen. AdvSim [213] wählt einen ähnlichen Ansatz: Punktwolken werden entsprechend einem veränderten, adversarialen Verhalten der Verkehrsteilnehmer gestört. NVIDIA Strive lernt eine latente Darstellung eines Verhaltensmodell in Form eines Graph-basierten, bedingten VAEs. Szenarien werden dann als Optimierung in diesem latenten Raum formuliert, um Trajektorien der anderen Verkehrsteilnehmer zu erzeugen, die mit Planerausgaben dessen zu kollidieren. Schließlich wird in [214] ein konditionales Diffusionsmodell (engl.: „*conditional diffusion model*“) in Verbindung mit einem Signal Temporal Logic (STL)-Modell vorgestellt. Das erlernte Diffusionsmodell wird dabei mit mittels in STL-Klauseln formulierte Regeln gestützt, um Verkehrsteilnehmerverhalten zur Simulationszeit zu generieren. Schließlich sei der Ansatz des „MultiVerse Transformer for Agent Simulation“ [215] erwähnt, der mittels eines generativen Prädiktionsmodells in der Lage ist, Verhalten in einer closed loop Schleife zu erzeugen.

In [216] wird ein neuro-kognitives Fußgängerhaltensmodell namens cogniBOT vorgestellt. Dieses basiert auf datengetriebenen Teilmodellen, die auf Messungen und Studien des Verhaltens, der Bewegung und der Entscheidungsprozesse von Fußgängern basiert. In [217] wird diese cogniBOT Systemarchitektur auf weitere Verkehrsteilnehmertypen verallgemeinert dargestellt. Es erlaubt aus einer Perceive-Think-Act Strukturierung heraus, für verschiedene Fähigkeiten sowohl daten-getriebene als auch parametrierbare Modelle anzuwenden.

In jüngster Vergangenheit wurde seitens WAYMO ein offener Benchmark „Open Sim Agents Challenge“ [218] zum Vergleich von datengetriebenen Ansätze der Verhaltensmodellierung, als auch mit Waymax eine auf Verhaltensmodellierung fokussierende Simulationsumgebung veröffentlicht [219].

### Wahrnehmungsbezogenen Realismus

KI-Verfahren werden ebenfalls zur Modellierung und Simulation von Sensoren (Kamera, Radar und Lidar) genutzt, um den Realismus zu steigern. In [220] werden Wasserstein-GAN für die Modellierung von Radar-Effekten genutzt. Im Bereich Kamera werden in [221] Rauschmodelle datengetrieben erlernt. WAYMO SurfGAN [222] und LiDARSim [223] fokussieren sich jeweils auf die datengetriebene Erstellung und das Erlernen der Gesetzmäßigkeiten der Kamera- und Lidar-basierten Abbildung einer Umgebung. In [224] wurde ein Verfahren vorgestellt, welches latente Diffusionsmodelle (engl.: „*video latent diffusion model*“) auf die Bildsynthese appliziert und temporale Bezüge mitberücksichtigt. Das Verfahren wurde dabei auf Dashcam-Aufnahmen trainiert und es wurden Bildsequenzen erstellt, die als Grundlage für Simulationen genutzt werden können [224].

Nichtsdestotrotz verbleiben für datengetriebene, mittels KI abstrahierte Modelle zahlreiche Fragen hinsichtlich ihrer Modellparameter und -qualität, dem Nachweis der Validität und insbesondere der zugrundeliegenden Datenbasis<sup>3</sup>.

### Co-Simulation

Die Modellierung und Simulation multi-disziplinärer, komplexer Systeme kann anhand zweier Ansätze erfolgen: Einerseits der Modellierung des gesamten Systems mittels einer einheitlichen Modellierungssprache, andererseits mittels der Integration von Modelle verschiedener domänenspezifischer Simulationswerkzeugen. Diese zeichnen sich durch jeweilige Expertenmodelle aus, die für einen jeweiligen Anwendungsfall komplexe und realistische Abbildungen bieten.

Geimer fasst in [225] die verschiedenen Begrifflichkeiten zusammen und betrachtet verschiedene Modellkopplungen und damit Varianten von Simulatorwerkzeugkopplungen. Die Varianten hängen dabei wesentlich von der Anzahl der Modellierungswerkzeuge und Integratoren ab: Liegt im betrachtenden System eine verteilte Modellbildung durch mehr als ein Modellierungswerkzeug sowie eine verteilte Simulation durch mehr als einen Integrator vor, spricht man von einer typischen Co-Simulation. Schließlich lassen sich Kopplungen auf Modell- wie auf Programmebene unterscheiden, wobei beim Letzteren die Steuerung der beteiligten Modelle durch ein Simulationsprogramm mit der geringsten Schrittweite übernommen werden muss. Schließlich ist die Onlinefähigkeit einer Co-Simulation ausschlaggebend für den Einsatz in HIL-Umgebungen.

---

<sup>3</sup>Der Ausblick in Kapitel 6 greift diese Herausforderungen nochmals auf.

In [128] werden folgende Bestandteile als notwendig für eine effiziente Co-Simulationsumgebung aufgezeigt: Umgebungs- und Sensormodell, ADAS oder HAD-Modell, Fahrzeugdynamikmodell und Middleware zur Verknüpfung zeitsynchronisierter Daten zwischen den benannten Modellen mit hoher Bandbreite und geringer Latenz. Es wird die Tendenz benannt, die allgemeinen Sensormodelle der Simulationswerkzeuge anstelle der von Sensorherstellern zur Verfügung gestellten Sensormodelle zu verwenden. Dadurch entsteht eine Lücke zwischen den durch reale Sensoren und den durch diese allgemeinen Sensormodelle erzeugten Daten. Diese Lücke beeinträchtigt dabei insbesondere die Zuverlässigkeit der Aussagen einer Co-Simulationsumgebung. Desweiteren spielen auch technische Herausforderungen (Rechenpower, Bandbreite, ...) eine wesentliche Rolle.

Als wesentliche Ansätze für die Co-Simulation wurden unter anderem das Functional Mock-up Interface (FMI), die System Structure and Parametrization (SSP) [226], und das Distributed Co-Simulation Protocol (DSP) [227, 228] entwickelt. Damit lassen sich Modelle, ihre Beschreibungen und Parameter, beispielsweise in kommerziellen Co-Simulationsumgebungen, wie AVL Model.Connect<sup>TM</sup> oder AVL Testbed.Connect<sup>TM</sup>, Open Source Co-Simulationsplattformen, wie Eclipse OpenMCx<sup>TM</sup> [229], oder Virtual Vehicle Independent Co-Simulation (ICOS) [230], miteinbinden und simulieren.

Neue Entwicklungen im Zuge der PEGASUS und ENABLE-S3 Forschungsprojekte untersuchen und erweitern die Anwendbarkeit von Functional Mockup Unit über das Open Simulation Interface [231] als generische Schnittstelle für die Einbettung automatisierter Fahrfunktionen. OSI basiert dabei auf einer Schnittstellenbeschreibung mit Google Protocol Buffer. So haben Hanke und Hirsenkorn ebenfalls [232, 233] die Anwendbarkeit von Functional Mockup Unit mit OSI vor dem Hintergrund der Sensordaten- und Grundwahrheitsgenerierung untersucht. Sie schlagen eine standardisierte Schnittstelle auf Basis von Objektlisten zur Kopplung verschiedener Simulationen vor. Dieser generische Ansatz zur Ankoppelbarkeit von Modulen an verschiedene Simulationsumgebungen erlaubt dann, mit Modellierungswerkzeugen, wie MathWorks MATLAB®/Simulink® oder auch Simulationsumgebungen, wie IPG CarMaker, siehe beispielhaft in [234], verwendet zu werden. Während der Verfassung der vorliegenden Schrift hat die ASAM e. V. die Obhut für die Weiterentwicklung und Standardisierung von OSI als Tool-übergreifende Schnittstelle übernommen [117].

## 2.7 Alternative Mixed Reality Ansätze

Verschiedene simulative Verfahren aus dem Bereich der Extended Reality (XR) integrieren dabei den Menschen als ein wesentliches Element in eine simulative Umgebung. Virtual Reality und Augmented Reality werden dabei als Ausprägungen des Milgram-Kontinuums [235] zumeist genannt. Das Milgram-Kontinuum stellt entlang einer Skala ein Kontinuum zwischen der vollumfänglichen Realität hin zu einer vollumfänglichen Virtualität als Intervall dar. Ausgehend von der



linken Seite des Spektrums wird eine reale Umgebung mit virtuellen Elementen angereichert, so dass die Realität hauptsächlich überwiegt. Die gegenüberliegende Seite des Kontinuums stellt eine vollständig digital modellierte Welt dar. Das Milgram-Kontinuum [235] beschreibt die möglichen Instanzen verschiedener Zusammensetzungen realer und virtuellen Objekte, wie beispielsweise im Kontext der Telepräsenz, siehe folgende Abbildung 2.12.

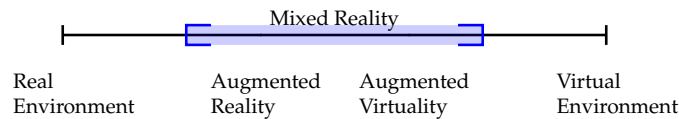


Abbildung 2.12: Das Reality–Virtuality Continuum nach Milgram [235].

Während der Erarbeitung der vorliegenden Schrift und den zugrundeliegenden Methoden sind zahlreiche Arbeiten um die Absicherung automatisierter Fahrfunktionen im Kontext von Mixed Reality entstanden. So wird menschliches Verhalten in VR-Umgebungen gegenüber automatisierten Fahrfunktionen in [236] oder auch [237] untersucht. Aspekte der Datenfusion aus virtuellen und aufgezeichneten, realen Sensordaten finden sich beispielsweise bei [238] oder [239]. Die closed loop-Verarbeitung innerhalb eines VIL-Anwendungsfalls selbst wurde in [240] für Kamera-basierte und in [143, 241] für Lidar-basierte Daten untersucht, wobei diese Arbeiten zeitlich nach den vorliegenden Arbeiten [Zofka et al., 2014b, Zofka et al., 2018b] entstanden sind. Diese Methoden konvergieren mehr und mehr zu digitalen Zwillingen [242]. Behnecke [243] und Riedmaier [104] vergleichen die Ergebnisse zwischen Fahrtests auf Prüfgelände und in der Simulation. Als beispielhafter datengetriebenen Ansatz ist [244] zu benennen, bei dem Verkehrsteilnehmermodelle in den 3D-Raum projiziert und dargestellt werden.

## 2.8 Verbleibender Forschungsbedarf

Zwei Herangehensweisen kristallisieren sich aus dem Stand der Forschung heraus, um die Diskrepanz zwischen der Realität und der virtuellen Abbildung zu schließen. Zum einen gibt es die auf Expertenwissen basierenden Modellierungen, die sich durch klare Nachvollziehbarkeit, Parameter und klare Schnittstellen auszeichnen. Zum anderen ergeben sich Ansätze, die – mittels KI-basierter Systeme – Modelle auf Beobachtungen und Daten ableiten und daher als datengetriebene Ansätze bezeichnet werden. Im Stand der Technik fehlen bislang jedoch Ansätze, die auf Expertenwissen-basierenden Teilmodellierungen mit entsprechenden datengetriebenen Methoden kombinieren, die auf zeitsynchron erfassten Messgrößen aus Referenzmesssystemen herkommen. Es fehlt damit an Methoden, die Vorteile beider Ansätze vereinen. Hierzu werden in der vorliegenden Arbeit datengetriebene Modellierung von Referenzmesssystemen zusammen mit auf Expertenwissen-basierenden Modellen über geeignete Co-Simulation gekoppelt, um reale und virtuelle Verkehrsteilnehmer mittels virtuell erweiterter Prüfgelände und Testfelder zusammenbringen zu können.



### **3 Anforderungsanalyse aus situativer und technologischer Perspektive**

Gleichermaßen müssen die Herausforderungen des Einsatzbereiches und die durch das automatisierte Fahrsystem benötigten Fähigkeiten betrachtet werden, um Anforderungen an die Darstellungsvielfältigkeit des Testsystems abzuleiten und fortführend entsprechende Lösungen über das Konzept der Arbeit zu ermitteln. Das vorliegende Kapitel adressiert die Anforderungsanalyse aus zwei Perspektiven: einer situativen und einer technologischen. Mittels der situativen Analyse werden typische Herausforderungen allgemeiner innerstädtischer Situationen extrahiert, wohingegen die technologische Perspektive aufzeigt, aus welchen funktionalen Bausteinen eine typische automatisierte Fahrfunktion vor dem Hintergrund der zu bewältigenden Herausforderungen strukturiert ist.

Typische Szenarien und Einflussfaktoren des innerstädtischen Verkehrsgeschehens werden hierfür in Abschnitt 3.1 betrachtet und auf wesentliche Einflussfaktoren hin analysiert. Über eine situative Perspektive wird dieses Verkehrsumfeld von dem automatisierten Fahren auf Autobahnen abgegrenzt. Typische städtische Herausforderungen werden hierzu gesammelt, und entsprechend den Herausforderungen der Straßenführung, dem Interaktionsgrad des System-under-Test mit weiteren Verkehrsteilnehmern gruppiert. Der Abschnitt 3.2 zeigt anhand im Kontext der vorliegenden Arbeit entstandener, prototypischer, hochautomatisierter Fahrfunktionen für verschiedene innerstädtische Anwendungen wesentliche Kernfunktionen einer Referenzarchitektur auf Basis ihres operativen Einsatzbereiches. Diese wird für die weiteren Untersuchungen und das aufbauende Konzept des Testsystems der virtuell erweiterten Testfelder und Prüfgelände herangezogen. Schließlich werden in Abschnitt 3.3 konkrete an das Testsystem abgeleitete Anforderungen festgestellt.

Die identifizierten Anforderungen werden somit dann entsprechend in Kapitel 4 mit dedizierten Teilbeiträgen über das Testsystem adressiert.

## 3.1 Das urbane Verkehrsumfeld

Die betriebspezifischen Einsatzbereiche und -bedingungen (engl. Abk.: „ODD“) einer automatisierten Fahrfunktion können zur Strukturierung von Verkehrssituationen herangezogen werden, siehe Abb. 3.1. Diese spezifizieren dabei die umweltbedingten, geografischen und tageszeitlichen Einschränkungen, die Existenz wie auch das Fehlen bestimmter Verkehrs- oder Straßenmerkmale, unter denen dieses in der Lage ist sicher betrieben zu werden. Zu den Betriebsbedingungen gehören unter anderem beispielsweise die Szenerie, wie Straßen oder befahrbare Bereiche, deren charakteristischen geometrischen und strukturellen Oberflächeneigenschaften, aber auch zu berücksichtigende, verkehrsregelnde Elemente, wie Verkehrszeichen oder Lichtsignalanlagen. Umgebungseinflüsse, wie Wetter- und Beleuchtungseffekte sind ebenfalls zu berücksichtigen. Schließlich tragen auch dynamische Einflüsse durch umgebende Verkehrsteilnehmer, ihr Verhalten und der dadurch entstehende Verkehrsfluss wesentlich bei.

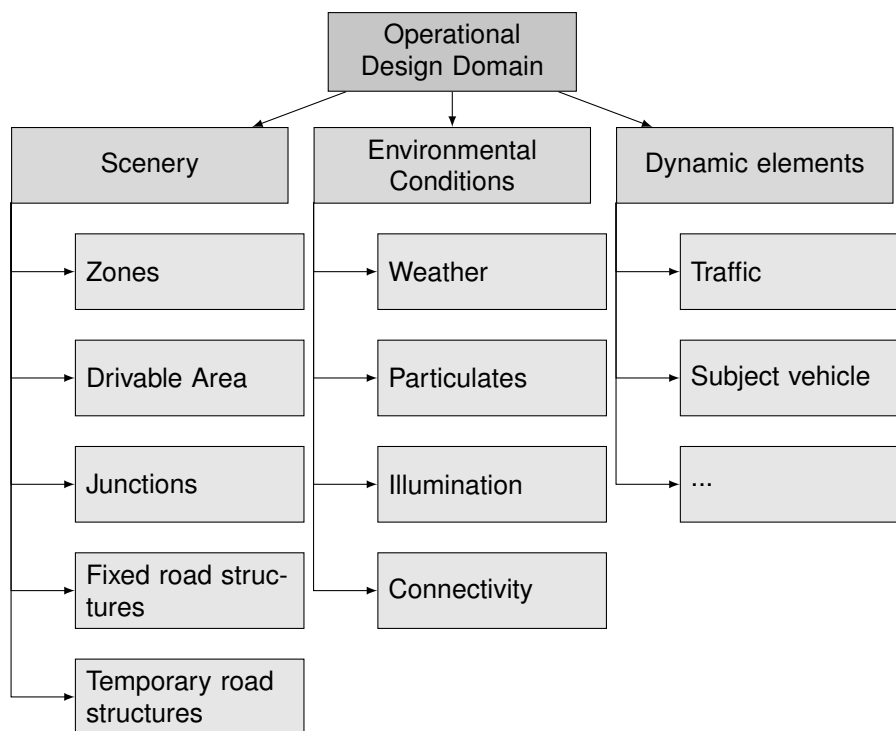


Abbildung 3.1: Eigene Darstellung der hierarchischen Modellierung des operativen, zulässigen Betriebsbereiches, angelehnt an PAS1883:2020 [245].

Der Stand der Technik bringt verschiedene Ansätze [246] zur Modellierung einer ODD hervor, beispielsweise durch die öffentlich verfügbare Spezifikation (engl.: „*publicly available specification*“) PAS1883:2020 [245], oder den SAE-Standard J3016 [247]. Auch befindet sich zum Zeitpunkt der Verfassung der Arbeit ein maschinen-lesbares und -verarbeitbares Format in der Entwicklung durch die OpenODD Initiative der ASAM e. V..

Diese Bedingungen geben somit ebenfalls die abzubildenden Aspekte für die durchzuführenden Tests und Erprobung der zugrunde liegenden Fähigkeiten des Testsystems vor. Im Folgenden werden die dem urbanen Umfeld vorherrschenden Verkehrssituationen gegenüber Szenarien des Umfelds Autobahn abgegrenzt, siehe folgenden tabellarischen Vergleich 3.1.







	Verkehrsumgebungen		
	Autobahn und Überland	Innenstadt	Parkflächen und -häuser
Makroskopische Sicht			
Mikroskopische Sicht			
Statische Straßenelemente	hauptsächlich longitudinale Straßenführung, Auf- und Abfahrten, ...	Kreuzungen, innerstädt. Kreisverkehre, Fußgängerüberwege, ...	Zufahrten, längs- und senkrecht positionierte Parkplätze, Spindeln, ...
Regulatorische Verkehrselemente	Verkehrszeichen, Markierungen, ...	Verkehrszeichen, Lichtsignalanlagen, Fahrbahnmarkierung, ...	Bordstein, Lichtsignalanlagen, Schranken, ...
Räumliche Ausdehnung der Szenarien	Auf- und Abfahrten, Manöverketten, ...	Punkt- zu Punktautomatisierung, bspw. letzte Meile	Parkplatz zu Übergabezone
typ. Verkehrsteilnehmer	Motorisierte Verkehrsteilnehmer	PKW, LKW, vulnerable Teilnehmer <sup>1</sup>	PKW, vulnerable Teilnehmer
typ. Geschwindigkeiten	0-200 km/h	0-50 km/h	0-30 km/h
Herausforderungen, Komplexität	hoher Dynamikbereich	Verdeckungen durch statische und dynamische Objekte, enge Passagen und Häuserschluchten, ...	Verdeckungen durch statische und dynamische Objekte, enge Passagen, Innenräume, ...

Tabelle 3.1: Charakteristische Umgebungsparameter und Betriebsbedingungen typischer Verkehrsumgebungen des hochautomatisierten Fahrens.

<sup>1</sup> Als vulnerable Verkehrsteilnehmer werden in der vorliegenden Arbeit insbesondere Fußgänger und Fahrradfahrer subsummiert.

Basierend auf den verschiedenen Betriebsbedingungen innerhalb des urbanen Verkehrsraums kann eine Klassifikation und Untersuchung durchgeführt werden. So orientiert sich die Aufteilung an den verkehrlichen Gegebenheiten, wie der Straßenführung, der Flexibilität für Fahrentscheidungen sowie der Interaktion mit weiteren Verkehrsteilnehmern. Aus der Betrachtung der zugrundeliegenden Straßenstruktur und Verkehrsführung kann beispielsweise eine Aufteilung in folgende Klassen abgeleitet werden, siehe auch folgende Abbildung 3.2:

**Komplexe Kreuzungsüberfahrten** (siehe Abbildungen 3.2a und 3.2b) im innerstädtischen Bereich sind durch verletzbare Verkehrsteilnehmer, komplexe Verkehrsregeln, verkehrsregelnde Elemente wie Markierungen, Beschilderungen sowie Lichtsignalanlagen gekennzeichnet. So subsumiert [248] Fehlinterpretationen, Unaufmerksamkeit und mangelnde Berücksichtigung möglicher Sichtbehinderungen als die wesentlichen Ursachen von Unfallgeschehen im Bereich von Kreuzungen und Einmündungen.

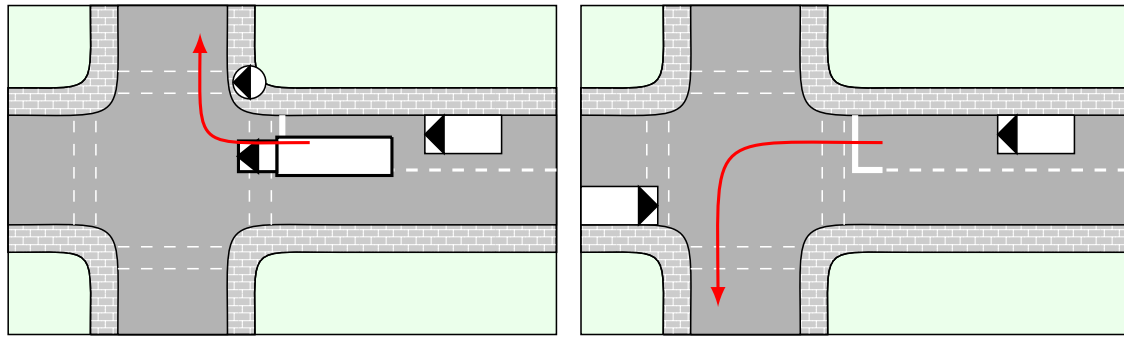
**Verdeckungssituationen** (siehe exemplarische Abbildungen 3.2c und 3.2d) können sich zwar durch eine übersichtliche und eindeutige Verkehrsführung im Sinne von Straßenzügen auszeichnen, die Szene ist allerdings durch dynamische Verdeckungen nicht einsehbar. Dies resultiert unter anderem aus durch Baustellen oder parkende Fahrzeugen eingebrachte Verdeckungen. Insbesondere dynamische Objekte, wie andere verletzbare Verkehrsteilnehmer, werden daher möglicherweise erst sehr spät erkannt. Diese Umgebungen sind hauptsächlich durch andere, dynamische Einflussfaktoren bestimmt und nicht an konkreten Örtlichkeiten festzumachen.

**Verkehrsmischflächen** (siehe exemplarische Abbildungen 3.2e und 3.2f) kennzeichnen Verkehrssituationen, die insbesondere durch einen hohen Interaktionsgrad zwischen verschiedenen Verkehrsteilnehmern geprägt sind. So regelt die Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) die Benutzung von Mischflächen sowie durch verletzbare, als auch motorisierte Verkehrsteilnehmer gemeinsam nutzbaren Raum, wie auch Parkflächen. Dies können Übergabezonen für das Car Sharing, Park- und Ladezonen für elektrifizierte Fahrzeuge, oder in Fußgängerzonen befindliche Haltestellen für automatisierte Pendelbusse<sup>2</sup> sein.

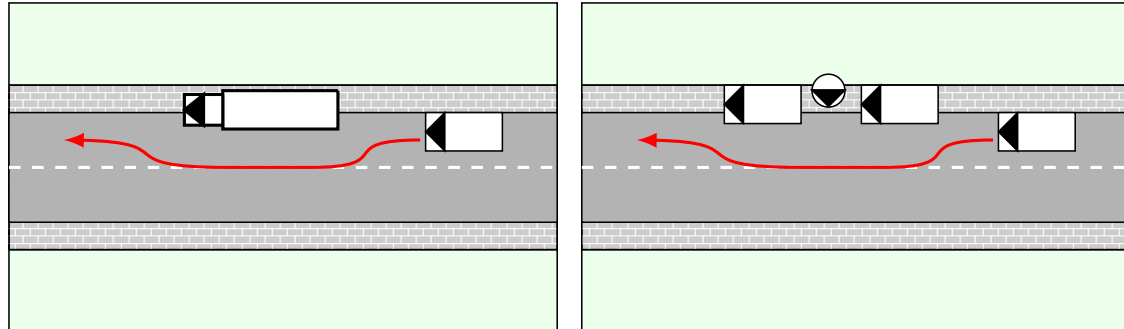
Die im urbanen Verkehrsumfeld mögliche Szenendynamik verstärkt die Kritikalität dieser Situationen. Eine der Ursachen stellt mögliches regelwidriges Verhalten verletzlicher Verkehrsteilnehmer, wie das Queren oder Überfahren der Straße trotz roter Lichtsignalanlagen oder auch das unerlaubte Ausscheren und Überholen, dar, auch wenn dieses unter bestimmten Bedingungen für Ambulanz- und Einsatzfahrzeuge beispielsweise nicht gilt. Weiterhin führen auch unauflösbare Situationen, wie das gleichzeitige Eintreffen in den verschiedenen Armen einer nicht signalisierten Rechts-vor-Links Kreuzung, oder das Fehlen einer möglichen Unfallvermeidungsstrategie, wie durch Bremsen verursachte Auffahrunfälle, zu Herausforderungen.

---

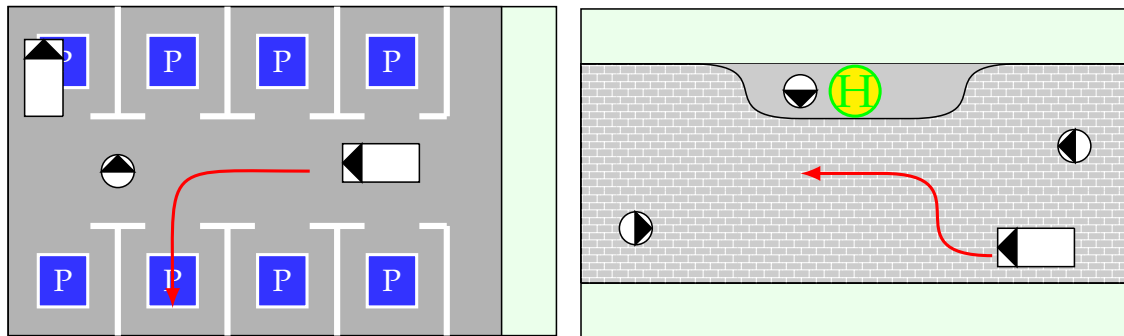
<sup>2</sup>Diese werden im Folgenden als Shuttles bezeichnet.



(a) Komplexe Kreuzungssituation: Rechts Abbiegen. (b) Komplexe Kreuzungssituation: Links Abbiegen.



(c) Verdeckte Situation: Umfahren eines stationären Hindernisses. (d) Verdeckte Situation: Querendes Element zwischen parkenden Fahrzeugen.



(e) Fußgänger und einparkendes Fahrzeug agieren auf Verkehrsmischfläche. (f) Passant, zukünftiger Passagier und Shuttle agieren auf Verkehrsmischfläche.

Abbildung 3.2: Herausforderungen urbaner Verkehrsszenen: Kreuzungs- und Verdeckungssituationen sowie Verkehrsmischflächen.

Schließlich sind auch urbane Szenarien, wie liegengebliebene und ungenügend abgesicherte Fahrzeuge, querende Tiere oder umstürzende Mülltonnen, im innerstädtischen Umfeld zu berücksichtigen. Diese Szenarien können dabei ungenügend oder gar nicht spezifiziert sein. Hier offenbart sich das Problem der „Open World“: Bekannte, reguläre Szenarienklassen kommen zahlreich vor, sind regelmässig beobachtbar und daher bekannt, Szenarienklassen des „long tail“ [249], gegenüber denen die Fahrfunktion robust ausgelegt sein muss, jedoch nur selten oder sind sogar gänzlich unbekannt. Diese stellen somit potentiell die unerwarteten und riskanten Szenarien für die Fahrfunktion dar [250].

## 3.2 Systemarchitekturen autonomer Fahrzeuge

Generell lassen sich die Herausforderungen verschiedener Verkehrssituationen gegenüber hochautomatisierten Fahrfunktionen nach unterschiedlichen Perspektiven betrachten und strukturieren. So wählen beispielsweise Wachenfeld und Winner eine anwendungsfallzentrierte Untersuchung [251] und unterscheiden zwischen Autobahnautomat mit Verfügbarkeitsfahrer, autonomes Valet Parking System, Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer und Vehicle-on-Demand System. Dabei werden die Anwendungsfälle nach ihren verschiedenen Merkmalen, wie beispielsweise der Art der Beförderten, Geschwindigkeit und Szenerie beurteilt.

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wurde zu drei hochautomatisierten Fahrfunktionen [Klemm et al., 2016, Ochs et al., 2025, Ş. Taş et al., 2018] verschiedener Anwendungsfälle im Rahmen der Konzeption, Umsetzung oder Absicherung wesentlich beigetragen. Deren exemplarische Systemarchitekturen werden im Kontext der Anwendungsfälle und damit den jeweils adressierten, operativen Einsatzbereichen und damit einhergehenden spezifischen Betriebsbedingungen, auch wenn diese als Prototypen und Machbarkeitsstudien entwickelt wurden, gesetzt. So dienen ein Automated Valet Parking (AVP) System [Klemm et al., 2016] für das automatisierte Befahren mehrstöckiger Parkhäuser, eine automatisierte Fahrfunktion für den ersten und letzten Meile-Betrieb [Ochs et al., 2025], wie auch die Entwicklung einer kooperativen Fahrfunktion für das Bewältigen von Kreuzungssituationen [Ş. Taş et al., 2018] als exemplarische Beispiele für verschiedene Einsatzbereiche im urbanen Verkehrsumfeld.

Anhand der Darstellung und Analyse dieser Fahrfunktionen wird folgend eine Referenzarchitektur auf Basis des Sense-Plan-Act Musters [42] abgeleitet, die als Untersuchungsgegenstand für das zu entwickelnde Testsystem dient. Die Architektur stellt damit eine exemplarische Referenzarchitektur dar, anhand derer das Testsystem motiviert und umgesetzt wurde. Diese sorgt für eine Verallgemeinerbarkeit und damit mögliche Portierung auf andere Systemarchitekturen.

### 3.2.1 Anwendungsfall: Automatisiertes Parksysteem für mehrstöckige Parkhäuser

Das im Forschungsvorhaben „Automatisiertes Parken und Laden von Elektrofahrzeug-Systemen“ (AutoPLES) entwickelte automatisierte Valet Parking-System (engl. Abk.: AVP) orientiert sich dabei an der Dienstleistung eines Park- und Ladesystem, bei dem ein Fahrzeug von einem Dritten entgegen genommen wird und händisch zu seiner bestimmten Parkposition gebracht, beziehungsweise von dort nach Aufforderung wieder an den Fahrzeugführenden übergeben wird. Perspektivisch soll dies dabei den Fahrzeugführenden entlasten, die zeitintensive Parkplatzsuche automatisiert durchführen und entsprechend mit der automatisierten Ladung elektrisch angetriebener Fahrzeuge verknüpfen. Somit soll auch



eine optimierte Auslastung von bestehenden, aber insbesondere im urbanen Raum knappen Parkflächen erreicht werden.



Abbildung 3.3: Das AVP System des Versuchsträgers CoCarZero bewältigt die Spindel eines mehrstöckigen Parkhauses autonom. Bildquelle: [Klemm et al., 2016] © 2016 IEEE.

Hierzu wurde ein Fahrzeug des Typs SmartED (engl.: „*smart electric drive*“) mit einem Multi-Lidarsystem, den erforderlichen Rechnersystemen und Aktuatorik zur automatisierten Längs- und Querregelung ausgerüstet. Die entsprechende Aktuatorik ermöglicht dabei die Ansteuerung von Lenkrad, Gas und Bremse, sowie den benötigten Licht- und Blinksignalen. Abbildung 3.3 stellt den hochgerüsteten Versuchsträger CoCarZero bei der Bewältigung des Spindelaufgangs des Parkhauses dar.

Die hochautomatisierte Valet Parking Fahrfunktion beinhaltet somit die Übergabe zwischen dem Menschen und der hochautomatisierten Fahrfunktion an einer definierten Übergabezone, die Abstimmung mit einem übergeordneten Parkmanagementsystem, die Entgegennahme einer letztendlichen Parkposition sowie die Integration in ein Roboter-gestütztes Lademanagement: Ab einer Übergabezone übernimmt die Automatisierung die Längs- und Querregelung des Fahrzeugs im Niedergeschwindigkeitsbereich von  $\leq 10$  km/h. Nach einer Registrierung am Parkmanagementsystem übernimmt die Automatisierung in Abstimmung mit diesem die Bewältigung eines mittels Schranke gesicherten Zugangs, und nimmt eine entsprechende Zielparkposition entgegen. Über eine zu bewältigende Spindelzufuhr im Innenraum des Parkhauses manövriert es zum Stockwerk des entsprechenden Zielparkplatzes. Entlang des Stockwerks bewältigt es die Fahrflächen und manövriert zu den ihm zugewiesenen Parkplatz, arretiert die Parkbremse und erteilt einem Laderoboter über das Parkmanagementsystem die Ladefreigabe.

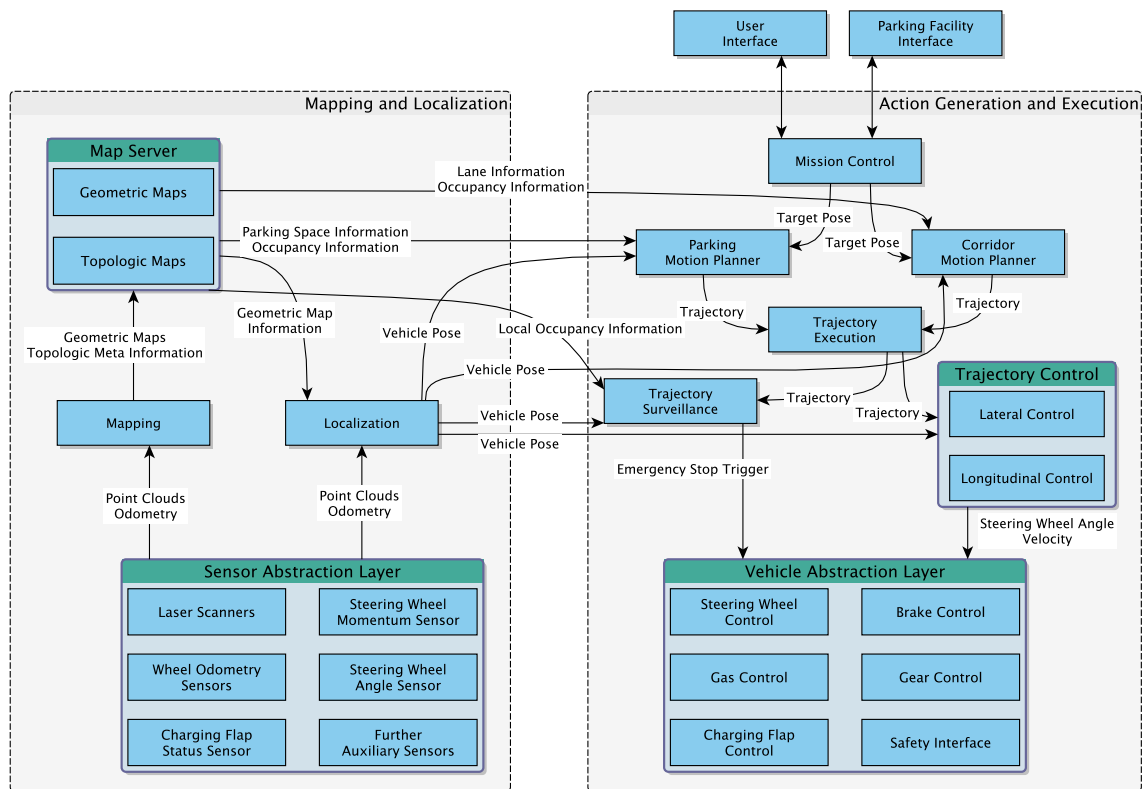


Abbildung 3.4: Systemarchitektur des AVP-Systems. Bildquelle: [Klemm et al., 2016] © 2016 IEEE.

Abbildung 3.4 skizziert die zur Bewältigung dieser Aufgabe abgeleitete Systemarchitektur der hochautomatisierten Fahrfunktion<sup>3</sup>: Propriozeptive und exterozeptive Sensordaten erfassen den Zustand des Fahrzeugs selbst und seiner direkten Umgebung. Diese Sensordaten werden einer Interpretationsschicht zugeführt, in der diese zu Hypothesen für die Existenzen anderer Objekte sowie zu strukturellen Elementen der Zielumgebung zugeordnet werden. Dies betrifft sowohl die Erkennung anderer Verkehrsteilnehmer als auch die Lokalisierung des eigenen Fahrzeugs anhand von a priori Wissen in Form von Kartenmaterial.

So wird im vorliegenden Vorhaben zur Lokalisierung des Fahrzeugs auf eine auf SLAM basierte, mehrschichtige, a priori erfasste Karte mit geometrischen Oberflächenbeschreibungen der strukturellen Hindernisse der mehrstöckigen Spindelzuführung als auch auf den planaren Parkebenen zurückgegriffen. Durch den Abgleich der Merkmale in dieser Karte mit der momentan erfassten Sicht des Multi-Lidarsystems wird auf die aktuelle Pose des Fahrzeugs rückgeschlossen. Diese Pose wird dann kontinuierlich den verschiedenen, für die jeweiligen Fahretappen und -manöver zuständigen Planern übermittelt.

Die Schaltung zwischen diesen übernimmt dabei eine Missionskontrollereinheit.

<sup>3</sup>Die betrachtete Funktion wurde im Projekt SmartEPark mit dem Schwerpunkt einer V2X-basierten Kommunikation mit einem Parkhausmanagementsystem weiterentwickelt, siehe [Schörner et al., 2021].

Diese verantwortet den Übergang zwischen beispielsweise dem Leerlauf, dem Übergang zwischen der manuellen und automatisierten Fahrzeugführung, dem automatisierten Fahren entlang der Korridore und dem eigentlichen Einparken, wie auch dem Übergang zwischen Parken mit und ohne Ladevorgang. Für die jeweilig zu bewältigenden Etappen, wie für das Befahren der Spindel, die Fahrt entlang von Korridoren sowie den Einparkmechanismus, der auf Manöver wie Vor- und Zurücksetzen gegebenenfalls angewiesen ist, werden von der Missionskontrolle die zu verwendenden Planungsalgorithmen per se unterschieden. Der Entwicklungsingenieur wird über den aktuellen Zustand der Fahrfunktion mittels einer Mensch-Maschine-Schnittstelle (engl.: „*user interface*“) informiert.

Die kontinuierliche Umgebungsüberwachung berücksichtigt dynamische Objekte im und um den zukünftigen Fahrweg herum, um eine kollisionsfreie und somit sichere Fahrzeugtrajektorie zu ermöglichen. Hierfür werden die durch das Multi-Lidarsystem erfassten Hindernisse unentwegt in ein Belegtheitsgatter eingetragen und Hindernishypothesen generiert. Somit werden diese in der Planungskomponente berücksichtigt, und es wird sichergestellt, dass auch plötzlich auftretende Verkehrsobjekte hochfrequent durch die Überwachung geschützt werden können.

Die aus den Planern stammenden Trajektorien und mit der kontinuierlichen Umgebungsüberwachung abgesicherten Trajektorien werden hochfrequent über die Aktoren des Fahrzeugs über entsprechende Regelungsalgorithmen eingeregelt. Hierzu wird die Abweichung der momentanen Ist-Position mit der Soll-Position entlang der geplanten Trajektorie anhand verschiedener Kriterien bewertet und minimiert. So spielen der Abstand, die Orientierungsdiskrepanz aber auch zukünftige Krümmung der Solltrajektorie eine wesentliche Rolle. Schließlich werden daraus abgeleitete Stellsignale an die Aktuatoren des Fahrzeugs übergeben und werden dort hochfrequent eingeregelt. Dies ermöglicht schließlich die markerbasierte Lokalisierung der Ladebuchse. Dieser Andockmechanismus wird über eine am Endeffektor des Roboters und damit am Ladestecker angebrachte Kamera durchgeführt.

Das gesamtheitliche System von der Perzeption über die Lokalisierung und Umgebungswahrnehmung bis zur Entscheidungsfindung konnte in mehr als fünfzig Erprobungsfahrten vom Parkhauseingang bis hin zu den auf der sechsten Ebene gelegenen Parkplätzen der Hofdienergarage in Stuttgart bewältigt werden [Klemm et al., 2016]. Die entscheidenden Komponenten für die Durchführung dieser Machbarkeitsstudie lagen im Wesentlichen auf dem Zusammenspiel zwischen Innenraumlokalisierung und gleichzeitiger Detektion kritischer dynamischer Hindernisse, wie Personen und weiterer Fahrzeuge. Dies stellt die Anforderung an eine Testumgebung, das Fahrzeug mit unterschiedlichen Belegungen von Verkehrsteilnehmern herauszufordern, und möglichst sensornah diese virtuelle Umgebung zu injizieren, so dass dieses Zusammenspiel getestet werden kann.

#### 3.2.2 Anwendungsfall: Erschließung der letzten Meile mit automatisierten Shuttles

Im Forschungsvorhaben „Elektrische, vernetzte und autonom fahrende Elektro-Mini-Busse im ÖPNV“ (EVA) wurde eine automatisierte Fahrfunktion zur Bewältigung des Personennahverkehrs entlang der ersten und letzten Meile in peri-urbanen Quartieren mit automatisierten, elektrifizierten und vernetzten Shuttle-Bussen erforscht und entwickelt. Die erste und letzte Meile kennzeichnet dabei die Wegstrecke zwischen der Haustüre und dem nächsten Zugangspunkt zum öffentlichen Personennahverkehr, beispielsweise dem Bus- oder Bahnverkehr, und ist daher typischerweise in peri-urbanen Quartieren verortet. Auf konkreten Zuruf (engl.: „on demand“) können somit Personen bedarfsgerecht befördert werden. Diese Quartiere zeichnen sich typischerweise durch enge Häuserschluchten, enge mit seitlich parkenden Fahrzeugen versehene Straßenzüge und typische Geschwindigkeiten  $\leq 30$  km/h, wie auch dem herausfordernden Verhalten verletzlicher Verkehrsteilnehmer, aus.

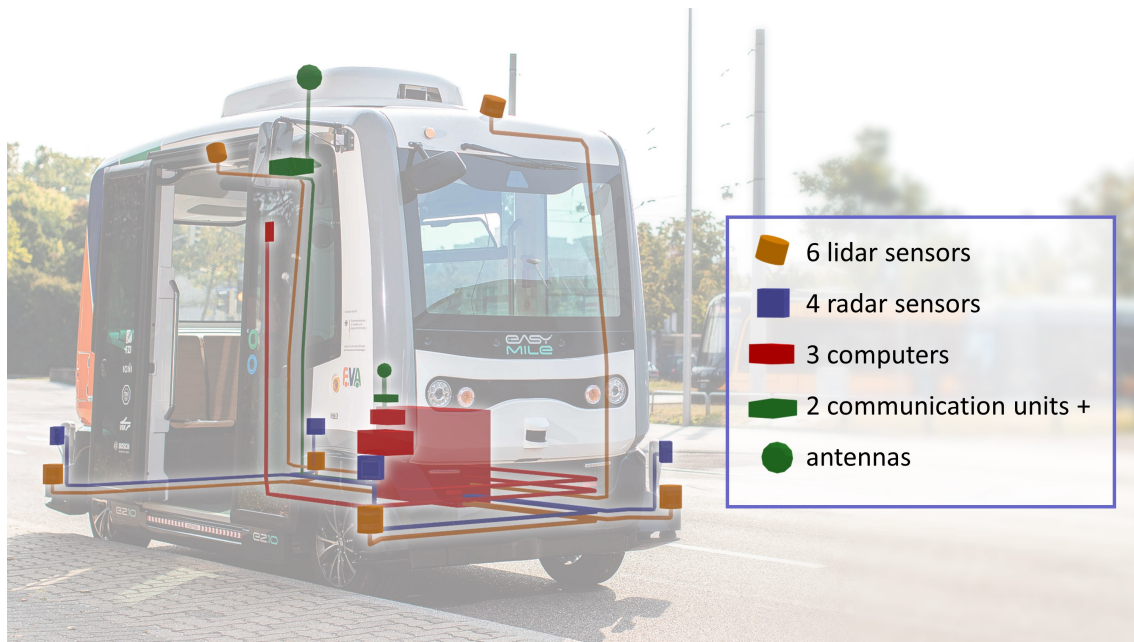


Abbildung 3.5: Sensor- und Rechnersysteme der EVA-Shuttles. Bildquelle: [Ochs et al., 2025] © 2025 IEEE.

Die hochautomatisierte Fahrfunktion soll dabei die Aufgabe eines bedarfsgerechten Mobilitätsdienstes übernehmen. Insbesondere in Quartieren und ländlichen Gebieten soll dieser Dienst den ÖPNV stärken, um Personen zu den nächstgelegenen Mobilitätshubs zu befördern und vereinen dabei die Vorteile eines bedarfsgerechten Personenverkehrs mit dem Betrieb innerhalb eines festgelegten Straßennetzes. Der zukünftige Passagier erteilt mittels einer Smartphone-basierten Applikation den Fahrtwunsch an den Dienstleister. Dieser Fahrtwunsch wird entsprechend zur betrieblichen Planung in die Beförderung eingetaktet und die

Person über die geschätzte Abholzeit informiert. Über die im Betrieb befindlichen Fahrzeuge wird eine entsprechende Einsatzplanung durchgeführt, um eine optimale Route unter Berücksichtigung vorkommender temporärer Hindernisse wie auch der bestehenden Fahrtrouten zu bestimmen. Nach Aufnahme der Person ordnet sich das Fahrzeug entsprechend in den vorherrschenden Verkehr innerhalb des Quartiers ein und transportiert die Person an das gewünschte Fahrtziel.

Im Vorhaben wurden Fahrzeugbasisplattformen EasyMile EZ10 mit einer vollständigen Ausrüstung von Rechner- und Sensorsystemen zur Bewältigung urbaner Herausforderungen ausgestattet, siehe Abbildung 3.5. Die Sensorausstattung der Fahrzeuge umfasst dabei eine inertielle Messeinheit zur Erfassung des propriozeptiven Zustands. Zur exterozeptiven Erfassung der Verkehrsumgebung wird ein Multi-Lidarsystem integriert. Die Sensoren erfassen dabei die Zustände der Umgebung, die dann an die nachgelagerte Wahrnehmungskomponente weitergereicht werden.

Innerhalb peri-urbaner Quartiere müssen insbesondere verletzbare Verkehrsteilnehmer wie Motorradfahrer, Fahrrad- oder E-Scooter Fahrende wie auch Fußgänger berücksichtigt werden. Weitere Herausforderungen stellen durch temporär haltende Lieferfahrzeuge, uneinsehbare Kreuzungen, wie auch unvorhersehbares Verhalten der erwähnten verletzbaren Verkehrsteilnehmer dar. Gleichzeitig gilt es, jederzeit den Schutz und Komfort der transportierten Personen sicherzustellen.

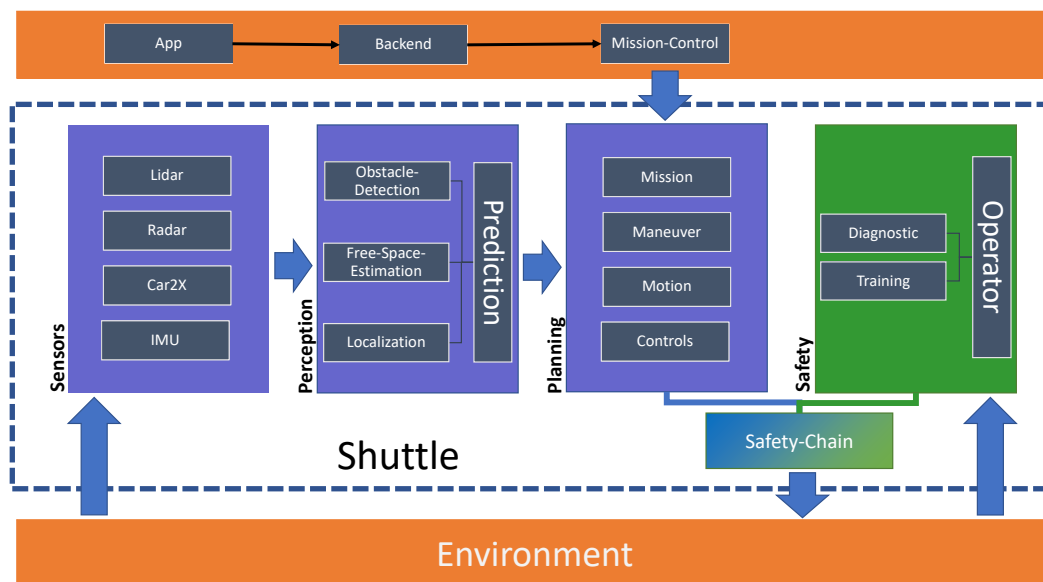


Abbildung 3.6: Die Systemarchitektur der automatisierten Fahrfunktion folgt dem Sense-Plan-Act Paradigmas mit expliziter Berücksichtigung eines Sicherheitsfahrers. Bildquelle: [Ochs et al., 2025] © 2025 IEEE; leicht modifiziert.

Abbildung 3.6 skizziert die für diese Aufgabe konzipierte und erprobte Fahrfunktion. Aus den exterozeptiven Sensoren Typs Lidar und Radar wird eine sensor-nahe Repräsentation der Umgebung in Form von Objekt-, beziehungsweise Hindernislisten sowie Punktwolken erstellt. Eine auf den Funkprotokollen IEEE 802.11p und ETSI ITS-G5 basierende Kommunikationseinheit ermittelt Zustände von in Funkreichweite befindlichen Lichtsignalanlagen mit zugehörigen lokalen Kreuzungskarten und übermittelt diese in das Umgebungsmodell. Zusätzliche Informationen über den Eigenzustand des Fahrzeugs werden aus einer inertialen Messeinheit erfasst.

Diese sensorisierten Informationen werden dann für die Hindernisdetektion, die Freiraumerkennung sowie Lokalisierung des Fahrzeugs verwendet. Hindernisse werden erkannt und nachfolgend in statische und dynamische Objekte unterteilt. Ebenfalls wird anhand der exterozeptiven Sensoren der befahrbare Bereich der vor dem Fahrzeug liegenden Straße ermittelt. Die Lokalisierung basiert dabei im Wesentlichen auf einem Lidar-basierten Ansatz, der anhand der aktuellen Punktwolken und einer in der Vorverarbeitungsphase erstellten Merkmalskarte eine Verortung des Shuttles vornimmt. Somit kommt auch hier ein entsprechender Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) Ansatz zum Einsatz. Ein Großteil der zum Einsatz kommenden Komponenten nutzt dabei verschiedene Merkmale hochgenauer Karten, um a priori Wissen mit den online erfassten Ausschnitten der Umgebung zu korrelieren und somit auf möglichst genaues Wissen zurückgreifen zu können.

Eine Verhaltensprädiktion schätzt anhand der erkannten und im Umweltmodell verorteten, umgebenen Verkehrsteilnehmer die zukünftigen Trajektorien dieser und bringt diese in die nachfolgende Planung mit ein. Eine hierarchische Planung nimmt die mittels Backend verwalteten Anfragen potentieller Nutzer entgegen und bricht diese auf Planungen auszuführender Fahrmanöver, Fahrzeugbewegung und schließlich Anregelungssignale für die verbauten Aktoren zur Längs- und Querregelung der Shuttles, sowie etwaige Lichtsignalisierungen herunter.

Das darunter liegende Sicherheitskonzept sichert den Betrieb über eine sogenannte Sicherheitswabe um das Fahrzeug herum ab und sieht die Möglichkeit einer Übersteuerung durch einen Sicherheitsfahrer vor, der das System jederzeit unter seiner Beobachtung und Kontrolle führt. Die Sicherheitswabe bestimmt in Abhängigkeit der aktuellen Geschwindigkeit „den minimal zulässigen seitlichen Abstand zu Hindernissen, um im Falle eines Fehlerfalles, wie z.B. Anforderung des maximal möglichen Lenkwinkels, rechtzeitig vor einer Kollision das Shuttle durch den Sicherheitsfahrer zum Stehen zu bekommen“ [252].

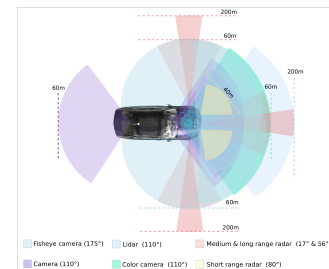
Die konzipierte und umgesetzte hochautomatisierte Fahrfunktion wurde im Jahr 2021 auf dem Testfeld Autonomes Fahren Baden-Württemberg im Stadtquartier Weiherfeld-Dammerstock in Karlsruhe im Rahmen einer dreimonatigen Phase mit über 700 Fahrten und über eintausend Passagieren auf der letzten Meile erprobt [Ochs et al., 2025]. Aufbauend auf den dortigen Erkenntnissen wurde die hochautomatisierte Fahrfunktion ergänzt und bis Ende 2023 schließlich über dreitausend Personen befördert [Flötteröd et al., 2025].



### 3.2.3 Anwendungsfall: Kooperatives, vernetztes Fahren

Im Rahmen des akademischen Wettbewerbs der Grand Cooperative Driving Challenge (2016) (GCDC) galt es, verschiedene Herausforderungen durch vernetzte, assistierte Fahrfunktionen zu bewältigen. Im Vergleich zu den vorherig betrachteten Anwendungsfällen stand dabei die technologische, funktionale Bewältigung mittels vernetzten und kooperativen Fahrens im Vordergrund. Aufgrund dieser Fokussierung, wie auch auf Überland- und Autobahnszenarien, wird diese Systemarchitektur nur angerissen und zur Verallgemeinerung der darauf aufbauenden Referenzarchitektur verwendet.

Drei verschiedene Szenarien galt es durch vernetztes, automatisiertes Fahren zu bewältigen: Innerhalb des ersten Szenarios auf einer zweispurigen Autobahn mussten sich zwei Fahrzeugplatoons aufgrund einer Baustellensituation auf der linken Fahrbahn und daher resultierenden Spurverengung kooperativ abstimmen, um sich über entsprechende Einfädelmanöver rechtzeitig auf die rechte Spur einzuordnen. Weiterhin wurde eine T-Kreuzung als zentrale Herausforderung adressiert, die es mittels Vernetzung und Kooperation zu lösen galt. Die sich zeitgleich und mit annähernd gleicher Geschwindigkeit nähernden, beteiligten Fahrzeuge mussten sich soweit abstimmen, dass weder eine Unterschreitung eines Sicherheitsabstands noch die Gewährung einer zu großen Zeitlücke auftraten. Außerdem wurde schließlich die automatisierte Bildung einer Rettungsgasse auf einem Autobahnabschnitt unter Annäherung eines Einsatzfahrzeugs erprobt. Der operative Betriebsbereich wurde dabei sehr spezifisch auf die jeweiligen, den Örtlichkeiten zugrundeliegenden Streckenverläufen (Kreuzungen, ...) des Austragungsorts in Helmond in den Niederlanden ausgelegt.



(a) Frontbild und Rechnerausstattung.

(b) Sensorkonfiguration.

Abbildung 3.7: Der Versuchsträger BerthaOne des KIT/FZI-Team AnnieWAY.  
Bildquelle: [Ş. Taş et al., 2018] © 2018 IEEE.

Für die Teilnahme wurde der Versuchsträger BerthaOne, einer zum automatisierten Fahren hochgerüsteten und befähigten Mercedes-Benz E-Klasse, verwendet, siehe Abbildung 3.7. BerthaOne zeichnet sich durch diverse Sensorsysteme aus, die die Umgebung um das Fahrzeug herum erfassen. Zur Erfassung der Zustände von Lichtsignalanlagen werden verbaute Kameras genutzt. Integrierte Radare unterstützen die Erfassung von Distanzen und Relativgeschwindigkeiten im mittleren und längeren Entfernungsbereich, insbesondere bei widrigen Wetter-

und Lichtbedingungen. Desweiteren ist BerthaOne mit vier Lidar-Systemen ausgestattet, um die Umgebung hinsichtlich Distanz und Genauigkeit zu erfassen. Die Ortung des Fahrzeugs basiert auf einer satellitengestützten Lokalisierung mittels GNSS-Aided Inertial Navigation System (GNSS/INS) Systemen.

Abbildung 3.8 zeigt die Systemarchitektur von BerthaOne auf. Der Fokus der Bewältigung der vorliegenden Szenarien lag dabei auf kooperativen Verhaltensmechanismen zwischen den beteiligten Verkehrsteilnehmern. Als Teil des operativen Einsatzbereiches wurde dabei angenommen, dass sämtliche Verkehrsteilnehmer kommunikative Fähigkeiten innehaben und sich entsprechend über das im Wettbewerb verständigte Protokoll austauschen. Somit wurde als wesentlicher Baustein die Umgebung über die Zusammenführung der Nachrichten der am Szenario beteiligten Fahrzeuge aggregiert und ein Umweltmodell gebildet. So flossen CAM, DENM und die eigens für den Wettbewerb definierten „i-GAME Cooperative Lane Change Messages“ (iCLCM) zusammen.

Auf Basis der Modellierung der umgebenden Objekte werden diese mittels einer Karte auf den Spuren verortet und beispielsweise mit einem Verhaltensmodell der konstanten Beschleunigung über einen zeitlichen Horizont hinweg präzisiert. Zur Bewältigung der kooperativen Absprachen wurde insbesondere auf besondere Verhaltensplanungsmechanismen gesetzt. Mittels entsprechender Zustandsmaschinen wurde die aktuelle Umwelt und Vorausschau entgegengenommen und Entscheidungskriterien auf durch das Fahrzeug durchzuführende Manöver abgebildet. Diese wiederum können dann mittels iCLCM an andere Teilnehmern übertragen und kommuniziert werden. Es ist offensichtlich, dass unsicherheitsbehaftete Lokalisierungsinformationen der Teilnehmer auch über Systemgrenzen unsicherheitsbehaftet weiterverarbeitet werden.

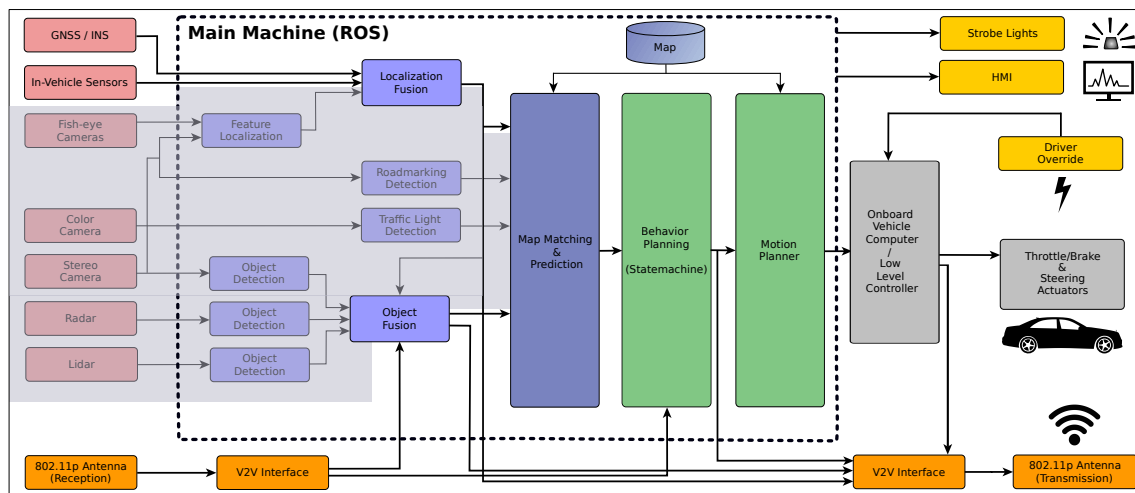


Abbildung 3.8: Systemarchitektur der kooperativen Fahrfunktionen von BerthaOne. Bildquelle: [Ş. Taş et al., 2018] © 2018 IEEE.



### 3.2.4 Bildung einer exemplarischen Referenzarchitektur

Die vorgestellten, hochautomatisierten Fahrfunktionen und deren zugrundeliegenden operativen Einsatzbereiche im urbanen Verkehrsumfeld dienen nun als Schablone für eine beispielhafte Referenzarchitektur. Die Architekturen orientieren sich dabei an einer Dekomposition der Fahraufgabe in einzelne funktionale Module. Diese Systemarchitektur der automatisierten Fahrfunktion bildet mit dem Fahrzeug und der direkten Verkehrsumgebung, in der sie betrieben wird, einen geschlossenen Regelkreis: Die vom Fahrzeug wahrgenommene Verkehrsumgebung wird dabei auf eine interne Sicht abgebildet, es wird eine Handlungsentscheidung getroffen und das Fahrzeugsystem zur Ausführung angeleitet. Die Reaktion der Umgebung bestimmt dann wieder den folgend wahrzunehmenden Zustand.

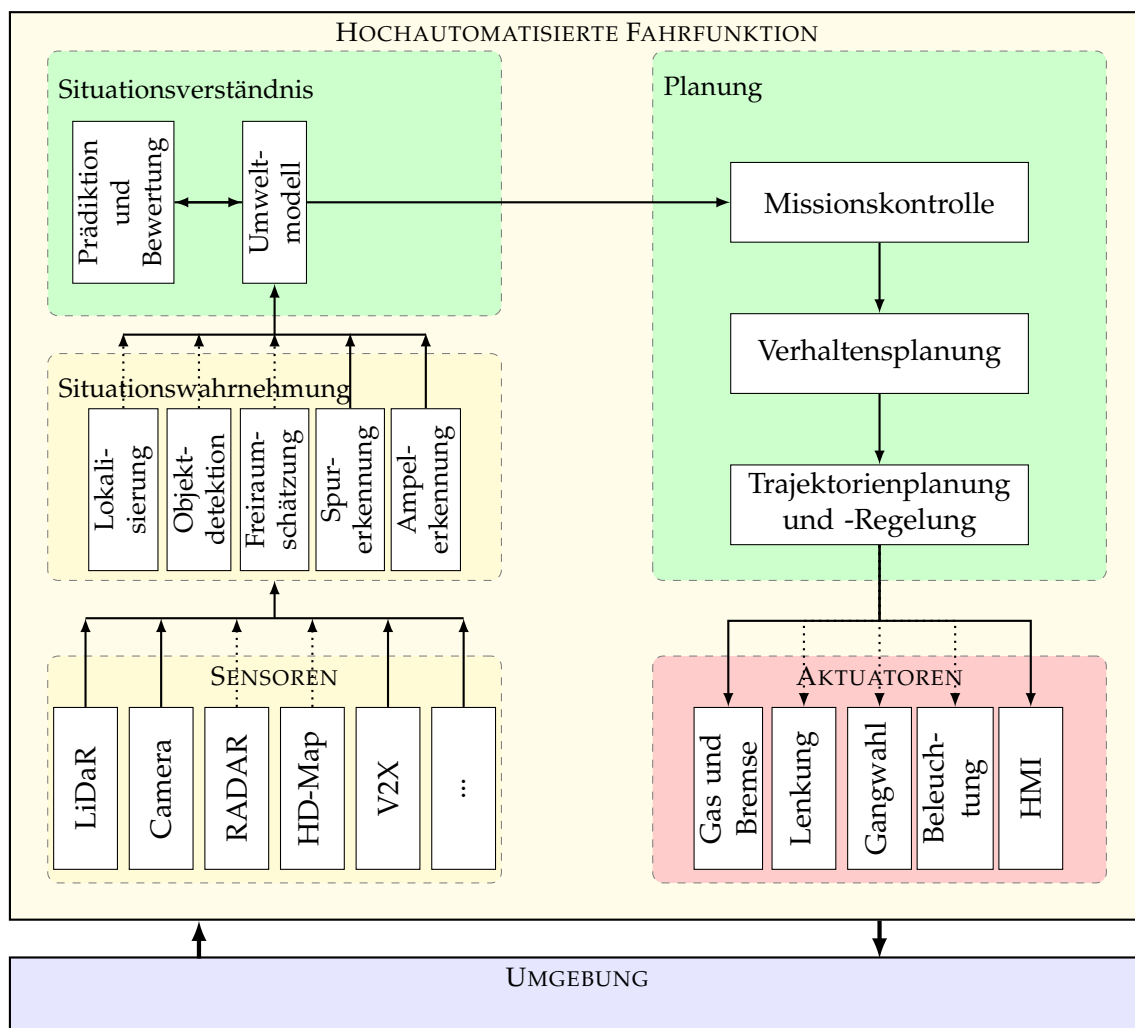


Abbildung 3.9: Referenzarchitektur einer hochautomatisierten Fahrfunktion. Die Verkehrsumgebung bildet mit der hochautomatisierten Fahrfunktion einen vollständigen Regelkreis. Eigene Darstellung.

Aus den drei benannten Systemarchitekturen wird für eine differenzierte Betrachtung die Referenzarchitektur in Abbildung 3.9 gebildet. Diese entspricht weitestgehend dem Sense-Plan-Act Muster [42] weiterer HAD-Systeme. Diese Referenzarchitektur besteht aus folgenden fünf Funktionsblöcken:

1. Sensorik zur Erfassung von Merkmalen der Umgebung und des Fahrzeugs,
2. Situationswahrnehmung zur Ableitung von konkreten, semantischen Verkehrseinheiten sowie Eigenschaften des Fahrzeugs und der Umgebung,
3. Situationsverständnis hinsichtlich situativer Fortentwicklung und beispielsweise Risikobemessung,
4. Planung der Mission, des Verhaltens und der Bewegungstrajektorie sowie
5. Fahrzeugaktuierung als Schnittstelle zum umgebenden Verkehrsumfeld.

Der funktionale Block der Sensorik bildet die Schnittstelle der automatisierten Fahrfunktion zum Fahrzeug und der umgebenen Verkehrssituation. Proprio- und exterozeptive Sensoren nehmen innere Fahrzeugzustände als auch den Zustand der das Fahrzeug umgebenden Verkehrssituation wahr. Dabei wird neben den Sensoren, auch die dortig angesiedelte immanente Datenverarbeitung von reinen Messsignalen, wie Bildsignalen oder Laserscans, hin zu höherwertigen Sensordaten wie Objektlisten, berücksichtigt. V2X-Sensoren erfassen funkseitig Zustände über Teilnehmer, Verkehrs- oder auch Wettergeschehen. Als weitere Wissensquelle werden hochgenaue Karten verwendet. Diese modellieren insbesondere a priori bekanntes Umweltwissen, die für verschiedene, nachfolgende Funktionen, im Zusammenspiel mit einer Fahrzeuglokalisierung genutzt werden können.

Der zweite funktionale Block des Situationsverständnisses ist verantwortlich, die in den Sensordaten partiell abgebildeten, höherwertigen Objekt- und Relationsbeschreibungen zu identifizieren. Diese werden erkannt, identifiziert und mit konkreten semantischen Bezeichnern versehen. Damit kann eine Einschätzung ihrer Rolle, ihrem Beitrag zur aktuellen Verkehrssituation wie auch zur Lösung der Fahraufgabe zugewiesen werden. Somit leiten dedizierte Funktionen beispielsweise die Eigenposition des Fahrzeugs ab, oder führen die Erkennung von Hindernissen, Markierungen, Verkehrsschildern und Ampeln wie auch den vor dem Fahrzeug befindlichen Freiraum durch.

Der dritte Block der Situationswahrnehmung repräsentiert das Situationsverständnis, welches die in dem vorherigen Block wahrgenommenen Teilaspekte und partiellen Elemente in einem möglichst einheitlichen, widerspruchs- und verlustfreien Umweltmodell zusammenführt und verortet, um Plausibilisierungen, wie auch Vorhersagen für zeitliche und damit auch räumliche Ereignishorizonte, vornehmen zu können. Dies kann von einzelnen, zeitlichen Betrachtungszeitpunkten über die Berücksichtigung einer vergangenen Historie der Situationsentwicklung bis hin zu Prädiktionen und Schätzungen möglicher Situationsentwicklungen der nahen Zukunft, das heißt im Bereich weniger Sekunden, reichen, um somit auch vorliegende Verkehrssituationen, beispielsweise auf das vorliegende Risiko oder potentiell zukünftige Risiken, bewerten zu können.

Auf dem Block des Situationsverständnisses setzt als vierter Block eine mehrschichtige Planung auf: Von einer abstrakten Planung der kompletten Fahraufgabe mittels der Missionskontrolle über eine Verhaltens- und Manöver(-ketten)planung, wird schließlich die Fahraufgabe als Planung von räumlich-zeitlichen Bewegungsmustern über Trajektorien bis hin zu deren Ausregelung verfolgt.

Schließlich bezieht als letzter funktionaler Block die Aktuierung des Fahrzeugs nicht nur die laterale und longitudinale Steuerung mit ein, sondern auch weitere Bedienbefehle an das Fahrzeug, wie die Ansteuerung der Lichtsignale. Ebenso dient eine Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI) zur Information eines potentiellen Mitfahrers, Passagiers oder auch eines Testingenieurs oder Entwicklers über aktuelle Zustände der Fahrfunktion. So schließt sich mit der resultierenden Reaktion des Fahrzeugs auf die Umgebung ein vollständiger Regelkreis.

## 3.3 Diskussion und Fazit

Aus der Betrachtung der Herausforderung urbaner Verkehrssituationen und der zur Bewältigung erforderlichen funktionalen Bausteine der Referenzsystemarchitektur lassen sich nun wesentliche, strukturelle Aussagen und Anforderungen an das Testsystem ableiten.

Die Herausforderungen lassen sich an folgendem beispielhaften Anwendungsfall skizzieren: In Parkhausinnenräumen oder schmalen, engen Fahrzeuggassen wird typischerweise auf eine relative Selbstlokalisierung mittels SLAM gesetzt. Dabei wird in einer Kartierungsphase eine Merkmalskarte der zu befahrenden Umgebung erfasst, eintrainiert und optimiert. In der Betriebsphase wird dann die aktuelle durch die Sensoren erfasste Umgebung in Form der Merkmale mit dieser prozessierten Karte abgeglichen, um eine Positionshypothese abzuleiten. Variiert nun die Umgebung zwischen Kartierungs- und Betriebsphase durch eine durch Fußgänger verdichtete Umgebung, wie durch wartende zukünftige Passagiere, nimmt das Fahrzeug potentiell eine eigentlich nicht-existente Wand wahr, und die Eigenlokalisierung schlägt somit fehl. Dieser Effekt tritt zu Tage, wenn erlernte Landmarken durch statische oder dynamische Objekte verdeckt werden.

Ausgehend von diesem skizzierten, einfachen Beispiel wird die Herausforderung ersichtlich: Erfasste Sensordaten gehen über interpretierte Verkehrsszenenbestandteile in die Entscheidungsfindung und Planung des Fahrzeuges mit ein. Zahlreiche Verarbeitungskomponenten entlang dieses Datenverarbeitungsflusses fußen ihre Interpretation der umgebenen Verkehrssituation auf Basis von datengetriebenen oder expertenwissenbasierenden Modellen. Divergiert die Realität von diesen den Funktionen zugrunde liegenden Modellen, so ist die Fahrfunktion nicht länger fähig, ihren Betriebsbereich sicher zu erfüllen. Dies gilt sowohl für Lokalisierung, als auch die Wahrnehmung und Ableitung von Verkehrsteilnehmerverhalten, und führt zu wesentlichen Fehlentscheidungen des Fahrzeugs in Entscheidungs- und Planungskomponenten und so im Gesamtverhalten.

Erstens wurden für die umzusetzende Testumgebung zu berücksichtigende Elemente aus innerstädtischen Verkehrsszenarien identifiziert. So muss ein automatisiertes Fahrzeug unterschiedliche Straßen- und Kreuzungstopologien, Parkplätze und -häuser und weitere, unter verschiedenen verkehrsregelnden Elementen, wie Lichtsignalanlagen, bewältigen können. Da HAD-Funktionen einerseits auf mehreren Sensorprinzipien fußen und andererseits diese verschiedenen Wahrnehmungsfunktionen zugeführt werden, hat dies verschiedene Auswirkungen: Abbildungen der Szenerie müssen verschiedene Sensormodalitäten berücksichtigen und müssen im Testsystem reproduziert werden. Außerdem wird eine skalierbare Abbildung zwischen realen und virtuellen Elementen der Szenerie benötigt, um entsprechend des Reifegrads der HAD potentielle Schäden des Versuchsträgers im Testversuch zu vermeiden. Es resultiert die folgende Anforderung:



**Anforderung 1. Skalierbare Abbildbarkeit von Straßen- und Verkehrsszenarien:** Das Testsystem auf Prüfgelände oder Testfeld soll reale Straßen- und statische Verkehrsszenen möglichst veränderlich darstellen können. Die beteiligten Elemente einer Verkehrsszene sollen augmentiert werden können, wenn eine Anpassung von realen, beitragenden Elementen zu lange, das heißt Kosten im Sinne der Zeit, oder zu teuer, das heißt Kosten im Sinne der benötigten Ressourcen, wäre.

Der Betriebsbereich im innerstädtischen Umfeld ist wesentlich geprägt vom Verhalten von vulnerablen Verkehrsteilnehmern, wie Fußgänger, aber auch Fahrrad-, Motorrad- oder E-Scooter- Fahrer sind schützenswerte Verkehrsteilnehmergruppen. Als Verdeckungen und Sichtbeschränkungen im Sensorbereich sorgen sie für eine Reduktion der Wahrnehmung des umgebenen Verkehrsgeschehens. Daneben stellt das dynamische, variantenreiche, auch zumeist irreguläre oder regelwidrige Verhalten dieser Verkehrsteilnehmer, Herausforderungen dar, die sicher und gefahrenfrei abgebildet werden sollen. Hier spielt ebenfalls mit ein, in welcher Rolle sich ein Fußgänger, wie Passant oder als zukünftiger Passagier, befindet. Das Verhalten wirkt insbesondere in der Verwendung der auf die Sensorik folgenden, funktionalen Komponenten, wie der Freiraum- oder Objektdetektion und deren Zwischenspiel mit der Eigenlokalisierung, mit ein. Es resultiert die folgende Anforderung:



**Anforderung 2. Gefahrenloses Testen bei gleichzeitiger Exposition realistischer Interaktionen zwischen Verkehrsteilnehmern und automatisiertem Fahrzeug:** Das Testsystem soll den Prüfling mit Regel- und Grenzverhalten von Fußgängern gefahrenlos und veränderlich exponieren lassen und gleichzeitig die Nachvollziehbarkeit und Beobachtbarkeit ermöglichen. Es soll eine Augmentierung an der Schnittstelle zwischen realer und virtueller Welt erfolgen, an der bewusst herbeigeführtes Fehlverhalten ohne Gefährdung des Versuchsträgers mit der zu prüfenden, automatisierten Fahrfunktion oder der beteiligten Verkehrsteilnehmer erfolgen kann.

Schließlich wurden wesentliche funktionale Schnittstellen hochautomatisierter Fahrfunktionen durch eine Analyse konkreter Anwendungsfälle unter spezifischen Betriebsbedingungen identifiziert. Diese Zugriffs- und Injektionspunkte sollen für eine Stimulation der hochautomatisierten Fahrfunktionen verwendet werden, um diese möglichst entlang der gesamten Wirkkette zu testen. Dabei haben Komponenten der Situationswahrnehmung mehrere Informationszuflüsse seitens der Sensorikkomponenten und -abflüsse aus den einer Verkehrssituation abgeleiteten Aspekten, die nachfolgend zum Umweltmodell beitragen. Es resultiert die folgende Anforderung:



**Anforderung 3. Evaluation der hochautomatisierten Fahrfunktion mit Teilsystemen von Objekterkennung bis hin zur Aktuierung:** Das Testsystem soll verschiedene Zugriffspunkte innerhalb der hochautomatisierten Fahrfunktion zur Einspeisung und Manipulation von realen Umgebungen mit virtuellen Signalen und Umweltmodellen mit Grundwahrheit ermöglichen. Entlang der Zugriffspunkte soll dabei die Beobachtbarkeit und Kontrollierbarkeit und damit Nachvollziehbarkeit der Testdurchführung ermöglicht werden.



## 4 Entwicklung virtuell erweiterter Testfelder und Prüfgelände

Basierend auf den Erkenntnissen des vorangegangenen Kapitels wird folgend das Konzept virtuell erweiterter Testfelder und Prüfgelände vorgestellt, welche die genannten Anforderungen über skalierbare Kombination realer Aspekte und virtueller Modelle adressiert. Die zur Überlagerung des vorliegenden Testfeldes oder Prüfgeländes mit virtuellen Elementen notwendigen methodischen und algorithmischen Bausteine als wesentliche Beiträge der vorliegenden Arbeit werden ausgeführt.

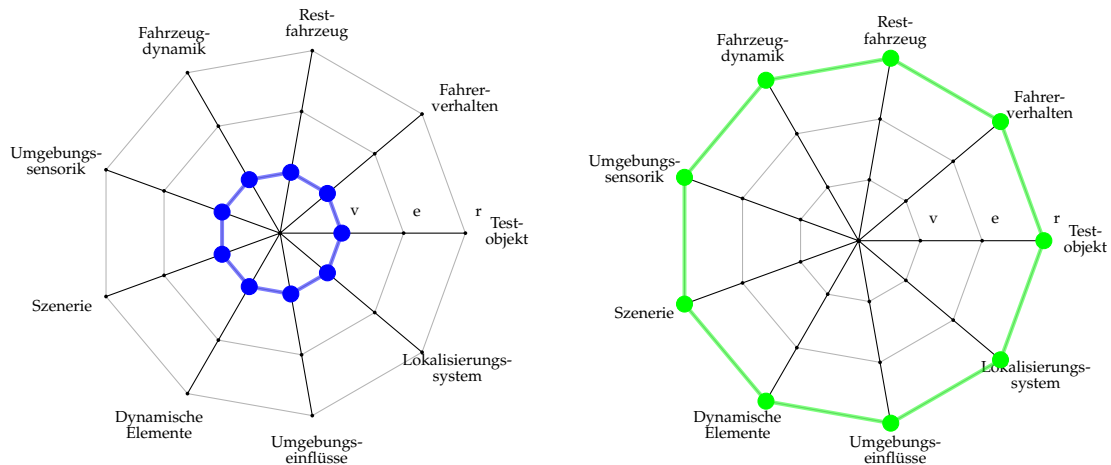
Das Kapitel leitet mittels einer Top-Down Betrachtung in diese Bausteine über: In Abschnitt 4.1 erfolgt die Definition und Bildung eines einheitlichen Metamodells, das eine flexible Instanzbildung für Testsystemkonfigurationen erlaubt. Hierzu werden Elemente einer Verkehrsszene über das Milgram-Kontinuum instantiiert und somit gemischt real-virtuelle Szenarien auf Testfeldern und Prüfgeländen ermöglicht. Kapitel 4.2 zeigt auf, wie Prüfgelände und Testfelder entsprechend mit statischen Szenerieelementen versehen werden können. Der darauf folgende Kapitel 4.3 führt die Augmentierung mit vulnerablen Verkehrsteilnehmern aus. Schließlich werden in Kapitel 4.4 die Fusions- und Augmentierungsstrategien erörtert, die eine direkte Zuführung der überlagerten Welt und damit Anregung an die hochautomatisierte Fahrfunktion erlauben. Kapitel 4.5 erläutert die Zusammenführung der einzelnen Bestandteile in eine flexible Co-Simulation zur kabellosen Vernetzung des Testsystems. Kapitel 4.6 fasst die wesentlichen Beiträge zusammen.

Im aufbauenden Kapitel 5 findet dann eine Bewertung der vorgestellten Beiträge statt.

## 4.1 Modellierung von Testsystemkonfigurationen zur Erzeugung virtuell erweiterter Szenarien

Die Zusammensetzung von gemischt virtuell-realen Szenarien erfordert die Modellierung von entsprechenden Prüfstandskonfigurationen, die das Zusammenspiel aus realen Entitäten mit virtuellen Abbildungen, den Modellen, koordinieren. Eine differenziertere Betrachtung verschiedener Aspekte einer Prüfstandskonfiguration bietet die Bewertungsmethode nach Steimle [253, 254] und aufbauend nach King [255]. Prüfstandskonfigurationen werden für eine Vergleichbarkeit jeweils auf sogenannte Radardiagramme abgebildet.

Folgende Kategorien der Konfigurationen werden dabei sternförmig angeordnet [253]: Testobjekt, Fahrerverhalten, Restfahrzeug und Fahrzeugdynamik, Umgebungssensorik, Szenerie, dynamische Elemente, Umgebungseinflüsse und Lokalisierungssystem sowie V2X-Kommunikation. Diese Kategorien werden dabei auf eine Nominalskala mit den Ausprägungen virtuell, emuliert und real abgebildet. Dies erlaubt somit die Unterscheidung einer realen Komponente, einer äquivalent wirkenden Ersatzkomponente oder einer digitalen Abbildung mittels eines Simulationsmodells. So lässt sich beispielsweise differenzieren, ob eine zu testende Funktion als Seriensteuergerät (real), als Rapid Prototyping Komponente (emuliert) oder auch als Softwaremodell (virtuell) innerhalb des Testsystems eingebettet ist [253].



(a) Absicherung mittels vollumfänglicher Simulationsumgebung.      (b) Absicherung mittels Realerprobung.

Abbildung 4.1: Einordnung rein virtueller Absicherung und der Realerprobung nach der Klassifikationsmethode von Steimle [253]. Darstellung entlehnt an [255]: Eine Konfiguration ergibt sich aus der Zusammenstellung realer Entitäten (r), emulierter Komponenten (e) und virtueller Abbildungen (v). V2X wird der Übersichtlichkeit halber ausgespart.



Die Testsystemkonfiguration einer vollumfänglichen Simulation wird über den Vergleich der Radardiagramme der Realerprobung in Abbildung 4.1 gegenübergestellt. Bei der Realerprobung liegen sämtliche Komponenten, der Fahrer und der Verkehr als reale Komponenten und Entitäten vor. Beide Konfigurationen stellen damit Extrematas der möglichen Testsystemkonfigurationen entlang des rechten Astes des V-Modells, siehe auch Abschnitt 2.5, dar. Nach [102] können innerhalb der Realwelttests typischerweise alle Bestandteile von der Sensorik bis hin zur Aktuierung des Fahrzeugs getestet werden, wohingegen bei Simulationen hauptsächlich Planungskomponenten bis hin zu den jeweiligen Perzeptions- und Aktuierungsschnittstellen der Simulation validiert werden können. Auf Prüfständen können allerdings „*over the air*“ Stimulatoren angewendet werden, um die Umgebungssensorik miteinschließend zu validieren.

Die starre Einteilung in real, emuliert und virtuell nach [253, 254] wird nun zur Betrachtung virtueller erweiterter Szenarien ersetzt. Hierzu werden, insbesondere motiviert aus Abschnitt 3.3, Kategorien der statischen Verkehrsszenenerie, der dynamischen Verkehrselemente sowie des Testobjekts und dessen Schnittstellen auf das Milgram-Kontinuum [235] (s. Abbildung 4.2) zwischen Virtualität und Realität eingeordnet. Aus einer modell- und objektorientierten Sicht lassen sich neue konkrete Instanzen für Testsystemkonfigurationen zwischen der modellbasierten Abbildung und der realen Beobachtung einzuordnen und zu vergleichen. Jenseits der linken Intervallgrenze des Kontinuums lässt sich der reale Fahrversuch ohne Einsatz jeglicher Modelle und jenseits der rechten Intervallgrenze der Einsatz von Simulationsumgebungen verortet. Sämtliche Aspekte des Verkehrsszenarios wie auch die automatisierte Fahrfunktion liegen hier als virtuelles Abbild vor.

Folgende Tabelle 4.1 zeigt Beispiele der untersuchten Kategorien auf:

Verkehrsszenenerie	Dynamische Elemente	Testobjekt-Schnittstellen
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Straßenverlauf, Mischverkehrsflächen, Fußgängerüberwege, Haltestellen</li> <li>• Parkflächen und -plätze</li> <li>• Verkehrslenkende Elemente: Baken, (statische) Verkehrsschilder, (verwitterte) Fahrbahnmarkierungen, Absperrpfosten</li> <li>• Umgebung: Gebäudestrukturen, Tiefgaragen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Motorisierte Verkehrsteilnehmer: PKW, LKW</li> <li>• Vulnerable Verkehrsteilnehmer, wie Fußgänger, Fahrradfahrer</li> <li>• Verkehrslenkende Elemente, wie Lichtsignalanlagen, Geschwindigkeitswechselanzeigen, Schranken</li> <li>• Straßenbegleitgrün, wie Bäume, Buschwerk oder Gräser</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ultraschall</li> <li>• Radardaten</li> <li>• Lidardaten</li> <li>• Gitterkarten</li> <li>• Objektlisten</li> <li>• HD-Kartenmaterial</li> <li>• V2X-Daten</li> </ul>

Tabelle 4.1: Beispielhafte Ausprägungen der Kategorien eines Verkehrsszenarios.

Die Erprobung auf Prüfgeländen und die Erprobung auf Testfeldern im öffentlichen Verkehrsraum lassen sich nun auf das Intervall abbilden. So wird die Erprobung in zuletzt genanntem als Abstufung der Realerprobung am linken Intervallende verortet, da sich diese durch smarte Infrastruktur und vorliegende Interaktion mit realen Verkehrsteilnehmern auszeichnet. Die smarte Infrastruktur gewährleistet die Beobachtbarkeit und partielle Kontrollierbarkeit über Elemente der digitalen Abbildung. Die Erprobung auf Prüfgeländen wird nahe der

#### 4 Entwicklung virtuell erweiterter Testfelder und Prüfgelände

virtuellen Umgebung verortet, da hier zahlreiche Modelle integriert werden können, entweder zur Ansteuerung rein digitaler Modelle oder auch als Verhaltensmodelle zur Ansteuerung von Dummy-Aufbauten. Testsystemkonfigurationen bestehend aus Modellen und realen Elementen lassen sich nun hier einordnen.

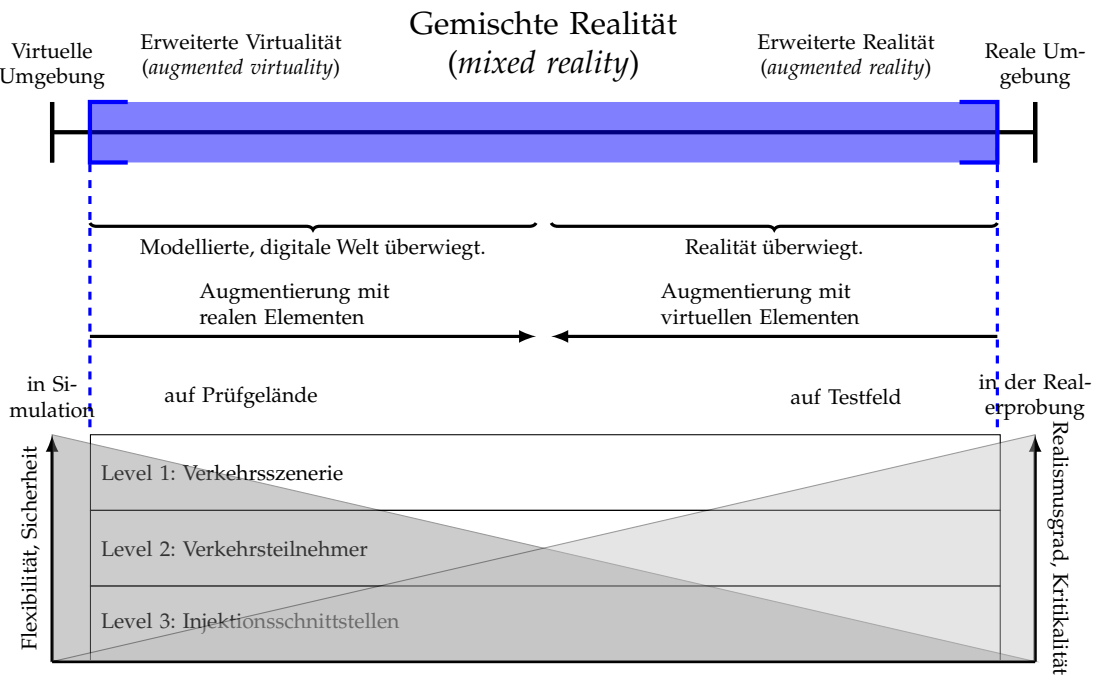


Abbildung 4.2: Abbildung der unterschiedlichen Verkehrsaspekte auf das Virtualität-Realität-Kontinuum nach Milgram [235] erlaubt Modellierung und Einordnung von Testsystemkonfigurationen.

Nun lassen sich die Aspekte der Verkehrsszenerie und -teilnehmer sowie der Selbstrepräsentation entlang der vertikalen Achse aufbringen. Hier können nun Elemente zwischen realen und virtuellen Instanzen variiert werden. Entlang der Horizontalen ergeben sich nun verschiedene Kriterien, die für Testsystemkonfigurationen abgeleitet werden können, wie der Realitätsgrad, die Kritikalität oder Flexibilität der zu stellenden Szenarien, sowie Sicherheit der Testdurchführung. Diese wirken dabei aber auch gegensätzlich. So nimmt der Realismusgrad einer Testdurchführung mit der wachsenden Anzahl modellierter Aspekte generell ab und ist in einer vollständig virtuellen Umgebung minimal. Gegenläufig dazu verhalten sich die Flexibilität der Augmentierung und damit auch Sicherheit des resultierenden Fahrversuchs. Diese ist bei der Prüfgelände-Erprobung maximal und beim Fahrversuch auf einem Testfeld im öffentlichen Verkehrsraum minimal.

So kann nun ein aus realen Entitäten und virtuellen Abbildern bestehendes Test-, beziehungsweise Zielszenario  $\mathcal{T}$  als eine Augmentierung eines Basisszenarios  $\mathcal{B}$  mit einem Augmentierungsmodell  $\Delta\mathcal{A}$  formuliert werden, siehe Abbildung 4.3:

$$\mathcal{T} = \mathcal{B} + \Delta\mathcal{A}. \quad (4.1)$$

Die ebenenweise Augmentierung [Zofka et al., 2018a] kann dabei verschieden stark erfolgen. Im weiteren Verlauf werden separate Augmentierungsfunktionen  $\zeta$ ,  $\tau$ ,  $\gamma$  und  $\eta$  eingeführt, die es erlauben, den Grad zwischen Realität und Virtualität der Modelle einer konkreten Testsystemkonfiguration zu bemessen.

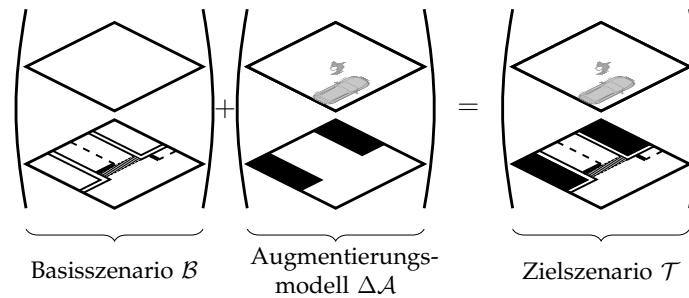


Abbildung 4.3: Augmentierung von Verkehrsszenen aus realen und virtuellen Verkehrsszenarioelementen und Verkehrsteilnehmern.

Ein Basisszenario wird im Wesentlichen durch den vorliegenden Straßenverlauf bestimmt. Dies trifft insbesondere auf die Testfelder des öffentlichen Verkehrsraums zu, da sich diese durch bestehende straßenbauliche und verkehrsregelnde Rahmenbedingungen auszeichnen und für mögliche Augmentierungen und Variationen - insbesondere innerhalb der Szenerie - eingeschränkt sind. Es kann somit nur ein **schwaches Augmentierungsmodell** angewendet werden. So können allerdings beliebige Zielumgebungen mit smarter Testinfrastruktur ertüchtigt werden, um die für die Tests geforderte Kontrollier- und Beobachtbarkeit zu erreichen, siehe [Zofka et al., 2018a, Schörner et al., 2021, Fleck et al., 2022].

Demgegenüber zeichnen sich Prüf- und Testgelände meist durch eine weniger fest strukturierte Umgebung aus und sind flexibler in der Augmentierung von Straßenverläufen, Gebäudestrukturen und damit urbanen Verkehrsszenarien. Es herrscht somit ein **schwaches Basisszenario** vor, welches mit einem starken **Augmentierungsmodell** von virtuellen Abbildungen augmentiert wird. Handelt es sich um ein Modell realen Ursprungs, wird dieser Ansatz nach [Zofka et al., 2018a] als **Szenario-to-go** bezeichnet.

Die Augmentierung lässt sich nun über ein Metamodell formalisieren, um eine einheitliche Darstellung und einheitliches Vorgehen zur Instanziierung von Testsystemkonfigurationen zu ermöglichen. Ein Metamodell in Bezug auf ein zu betrachtendes System (engl.: „*system under study*“, Abk.: SUS) ist nach [256] definiert:



**Definition 10.** «A metamodel is a specification model for a class of SUS, where each SUS in the class is itself a valid model expressed in a certain modeling language. That is, a metamodel makes statements about what can be expressed in the valid models of a certain modeling language.»

Somit bietet sich ein Metamodell als Grundlage für Automatismen an, um Model-  
linstanzen und Zusammenschlüsse generieren zu können. Ebenso ermöglicht ein

Metamodell über Transformationen Modelle in andere Repräsentationen zu überführen. Das Metamodell fasst die mittels Teilmodellen abzubildenden Aspekte zusammen und formalisiert die Beziehung der verschiedenen Teilmodelle zueinander. Es definiert also ein Vorgehen mit Regeln, Eigenschaften und Rahmenbedingungen, nach denen eine Instanz gebildet wird.

Das Metamodell  $\mathbb{S}$  lässt sich nun als ein Tripel dreier Modellsammlungen, dem Szeneriemodellcontainer  $\mathbb{U}$ , dem Verhaltensmodellcontainer  $\mathbb{V}$  sowie dem Injektionsmodellcontainer  $\mathbb{I}$  formalisieren:

$$\mathbb{S} := (\mathbb{U}, \mathbb{V}, \mathbb{I}) \quad (4.2)$$

Der **Szeneriemodellcontainer**  $\mathbb{U}$  modelliert die veränderliche, aus realen und virtuellen Elementen zusammengesetzten Straßenverläufen und statische Umgebung. So können für eine statische Szenerie aus realen Entitäten (Hindernisse, ...) und virtuellen Elemente beispielsweise Verdeckungen erzeugt werden. Dieser Sachverhalt lässt sich aus den Anforderungen an das Testsystem betrachten: Entsprechend des Reifegrads der zu testenden Fahrfunktion kann eine Testsysteminstanz gewählt werden, indem potentiell beim Test auftretende Schäden dem benötigten Realismusgrad gegenüberstellt und gewichtet werden. Allerdings geben die straßenbauliche Form und Gestalt der zur Verfügung stehenden Testfelder und Prüfgelände die möglichen Freiheitsgrade zur Veränderung der statischen Szenerie unter Berücksichtigung verkehrsregelnder Elemente vor.

Weiterhin bildet der **Verhaltensmodellcontainer**  $\mathbb{V}$  die Interaktion des hochautomatisierten Fahrsystems mit realen und virtuellen Verkehrsteilnehmern, wie auch weiteren einflussnehmenden Verkehrselementen, wie Lichtsignalanlagen oder Geschwindigkeitswechselanzeichen, ab. Entlang des real-virtuellen Kontinuums können hier verschiedene Instantiierungen von virtuellen Verhaltensmodellen bis hin zu realen, via Regelmechanismen und Motoren bewegte Fußgängerattrappen gewählt werden. Mit weiterem Fortschreiten von der sensorischen Ebene bis hin zum Umweltmodell, auf dem die Entscheidungsfindung stattfindet, werden mehr und mehr Modelle zum Ersatz realer Komponenten, wie Sensoren, benötigt. Auch hier kann somit eine Skala über virtuellen und realen Teilmodellen definiert werden.

Schließlich formalisiert der **Injektionsmodellcontainer**  $\mathbb{I}$  die für die Anregung charakteristische Tiefe der Injektion in das hochautomatisierte Fahrsystem und die damit zusätzlich benötigten Residualmodelle in Form von Umgebungs- und Sensormodellen. Je tiefer innerhalb der automatisierten Fahrfunktion eine solche Injektion, und damit Anregung dessen erfolgt, desto tiefergehende, umfangreichere virtuellen Sensor- und Umgebungsmodelle werden benötigt, um diese Information in Form von Stimuli, beziehungsweise Datenmustern, bereitzustellen. Außerdem wird die für die Realität entsprechende Grundwahrheit in Form dieser Datenmuster benötigt, wie beispielsweise Objektlisten der in der Umgebung befindlichen Objektstrukturen. Je näher sich die Injektionstiefe an die sensorielle Ebene heran bewegt, desto aufwendigere Modelle werden benötigt.

## 4.1 Modellierung von Testsystemkonfigurationen zur Erzeugung virtueller Szenarien

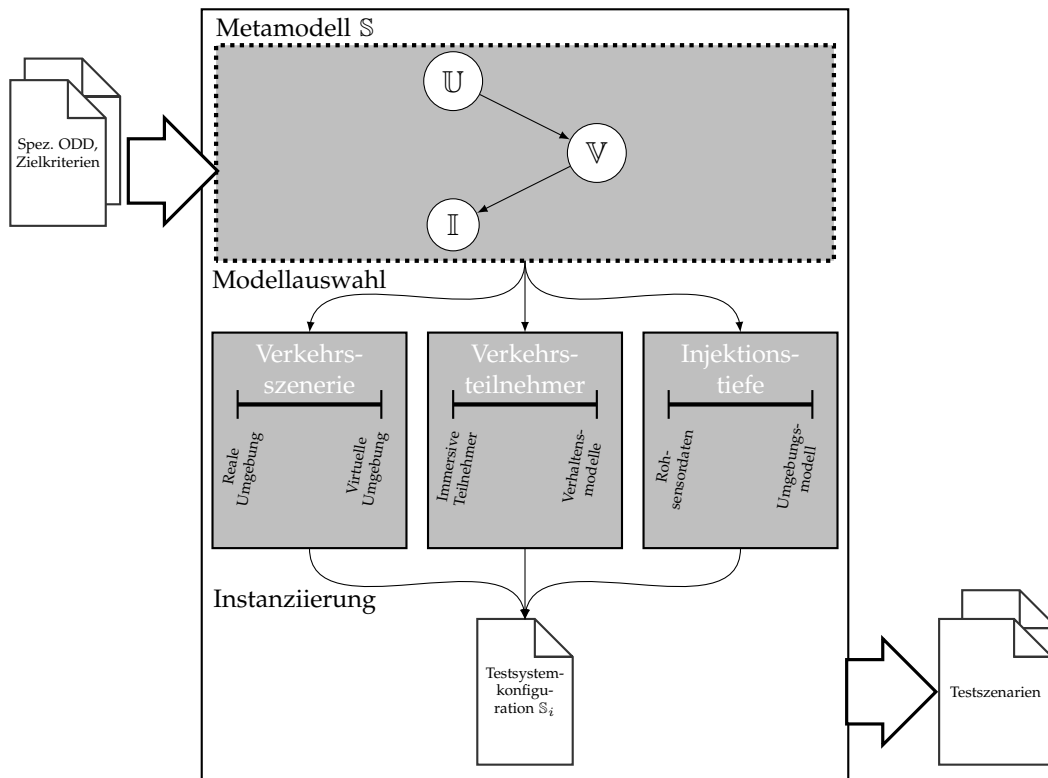


Abbildung 4.4: Metamodell orchestriert Instanziierung der Modellklassen und somit die Ableitung von Testsysteminstanz und Testszenarien.

Abbildung 4.4 stellt den stufenweisen Prozess der Ableitung von den Anforderungen über die Testsystemkonfiguration bis hin zur Bildung konkreter Testszenarien dar. Dabei fließen beispielsweise Anforderungen aus der ODD des zu testenden Systems, Anforderungen aus der aktuellen Phase des Entwicklungszyklus, des Testkataloges oder Kriterien wie Beobachtbar-, Kontrollierbar- und damit einhergehend Wiederholbarkeit in die Instanziierung mit ein.

Eine Testsysteminstanziierung des Metamodells  $\mathbb{S}$  ergibt sich aus der Wahl einer statischen Szenarie aus realen und virtuellen Hindernissen, der Wahl der Verhaltensabbildung von verletzlichen Verkehrsteilnehmern sowie einer zu definierenden Injektionstiefe mit notwendigen Sensor- und Verarbeitungsmodellen. Diese führt zur Testsystemkonfiguration  $\mathbb{S}_i$  mit konkreten Modellen  $\mathbb{U}_i$ ,  $\mathbb{V}_i$  und  $\mathbb{I}_i$

$$\mathbb{S}_i = (\mathbb{U}_i, \mathbb{V}_i, \mathbb{I}_i). \quad (4.3)$$

Für die Ausführung sind die entsprechenden Modelle zu parametrieren. Eine Variation dieser modellspezifischen Parameter führt dann wiederum zu einer Liste von konkreten Testfällen, denen die hochautomatisierte Fahrfunktion ausgesetzt wird. Auf Basis einer Testsystemkonfiguration  $\mathbb{S}_i$  können nun durch Variation der modellspezifischen Parameter Testszenarien durchgeführt werden. Innerhalb dieser Testszenarien wird die hochautomatisierte Fahrfunktion erprobt und jeweils ein Gütemaß für dessen Bewertung bestimmt.

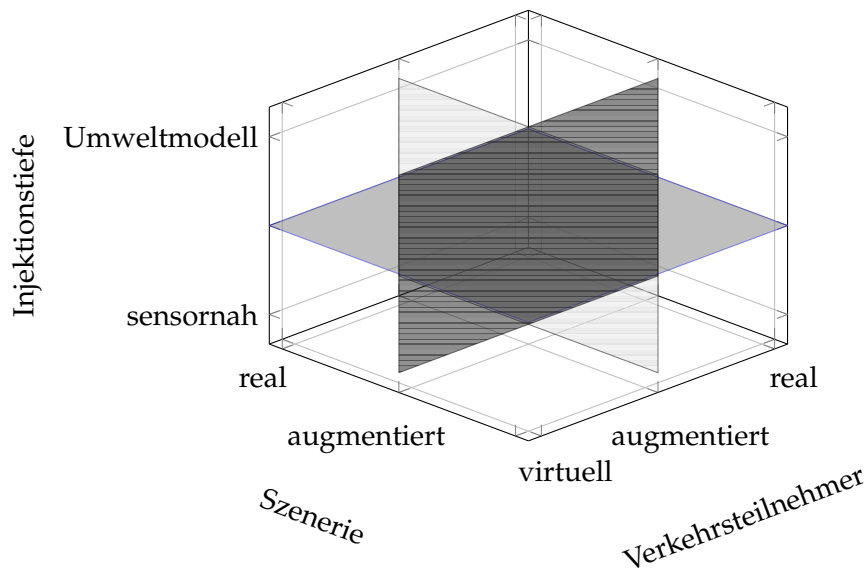


Abbildung 4.5: Grenzliegende Bewegungen durch den durch das Metamodell aufgespannten Raum der Testsystemkonfigurationen.

Zusätzlich zur Definition und Auswahl einer Testsystemkonfiguration ermöglicht das Metamodell ein strukturiertes Vorgehen mittels verschiedener Bewegungsmuster, nach denen Konfigurationen des Testaufbaus erzeugt werden können. In Abbildung 4.5 werden drei beispielhafte Bewegungen entlang der Extremata des vom Metamodell aufgespannten Raums skizziert. Für jede dieser Achsen werden im Folgenden Augmentierungsfunktionen vorgestellt, die eine Ordnung auf den jeweiligen Achsen definieren und damit Bewegung durch Iterierbarkeit erlauben<sup>1</sup>.

**Konstante statische Umgebung:** Bei einer konstanten, augmentierten Umgebung werden Verhaltensmodelle anderer Verkehrsteilnehmer sowie verschiedene Injektionspunkte iteriert. Dieses Vorgehen erhöht die Robustheit der hochautomatisierten Fahrfunktion hinsichtlich der verschiedenen Elemente der Perzeptionspipeline auf variierende Verhalten der Verkehrsteilnehmer auf Merkmals- und Objektebene im Umgebungsmodell.

**Konstantes Verhalten:** Bei einem fixierten Verhalten der Verkehrsteilnehmer werden die Umgebungen und die Injektionstiefen in die hochautomatisierte Fahrfunktion variiert. Die Robustheit wird hinsichtlich der Wahrnehmung der statischen Umgebung und auf dieser basierenden Einschätzungen und Entscheidungsfindung getestet.

**Konstante Injektionsebene:** Bei einer konstanten Injektionsebene werden die jeweiligen beinhalteten Prüflingskomponenten hinsichtlich ihrer Variierbarkeit verschiedener statischer Umgebungen und Verhaltensvariationen getestet.

<sup>1</sup>Bewegungsstrategien durch den mittels Metamodell aufgespannten Modellraum sind nicht Fokus der vorliegenden Arbeit und werden daher in Kapitel 5.7 kurz beleuchtet.

## 4.2 Abbildung von Prüfgeländen und Testfeldern in digitalen Zwilling

Der Szenariemodellcontainer  $\mathbb{U}$  modelliert die Zusammensetzung der statischen Szenerie aus realen und virtuellen Elementen, wie der Straßenstruktur und verkehrsregelnden Elementen, auf Prüfgeländen und Testfeldern. Diese werden über die dortigen straßenbaulichen Gegebenheiten und Möglichkeiten, wie auch die infrastrukturellen Ausstattung vorgegeben. Dazu wird im Folgenden deren Abbildung auf einen digitalen Zwilling mit den technologischen Bausteinen, den Referenzmesssystemen, der hochgenauen Karte als auch der intelligenten Infrastruktur, vorgestellt. Dieser digitale Zwilling ist als maschinenlesbares und -verarbeitbares Modell der Kern, um Überlagerungen der realen Umgebung mit virtuellen Verkehrsobjekten und somit gemischt virtuelle reale Szenarien durchführen zu können.

Die Beiträge der benannten technologischen Bausteine werden zu einem gemeinsamen Fähigkeitenmodell des digitalen Zwillings auf die geforderten Eigenschaften der Kontrollierbarkeit, Beobachtbarkeit und Wiederholbarkeit abgebildet. Dazu stellt Abschnitt 4.2.1 das Modell zur Beschreibung von Fähigkeiten von Prüfgeländen und Testfeldern vor. Die Rolle der hochgenauen Karte für die Darstellung und Augmentierung von gemischt real-virtuellen Verkehrsszenen wird in Abschnitt 4.2.2 diskutiert. Abschnitt 4.2.3 detailliert den Aufbau von Referenzmesssystemen und Vernetzungskomponenten und deren Rolle zur Auswertung mittels die Gesamtsituation betrachtender Metriken.

Der Szenariemodellcontainers  $\mathbb{U}$  spannt dabei entsprechende Freiheitsgrade auf und erlaubt die Gestaltung verschiedener Szenarien. Diese Modellierung wird anschließend in Abschnitt 4.3 um die Ansätze zur Modellierung des Verkehrsteilnehmerverhaltens  $\mathbb{V}$  sowie der Injektionsschnittstellen  $\mathbb{I}$  der hochautomatisierten Fahrfunktion in Abschnitt 4.4 ergänzt.

### 4.2.1 Beschreibung der Fähigkeiten im digitalen Zwilling

Den wesentlichen Bestandteil zur Abbildung von Prüfgeländen und Testfeldern stellt die intelligente und vernetzte Infrastruktur dar. Vergleichbar mit anderen Validierungsumgebungen [257], besteht ein solcher komplexer Systemverbund (SoS) aus vielfältigen, heterogenen Sensorsystemen, Rechen- und Kommunikationseinheiten, wie auch Aktoren. Sie kann mit ihren Ressourcen und Fähigkeiten zu einer Testumgebung zusammengefasst werden, um ein hochautomatisiertes Fahrsystem als Prüfling einzubetten und somit in einer geschlossenen Regelschleife bewerten zu können. Die folgenden funktionalen Bausteine für die intelligente und vernetzte Verkehrsinfrastruktur als Testsystem wurden innerhalb des Testfeld Autonomes Fahren Baden-Württemberg konzipiert und prototypisch umgesetzt, siehe [Fleck et al., 2018, Fleck et al., 2020, Zipfl et al., 2020, Zofka et al., 2022, Zofka et al., 2023].

Aufgabe der intelligenten und vernetzten Infrastruktur als Teil eines Testsystems ist es, die vorliegende Verkehrssituation zu erfassen, in eine passende Beschreibung zu überführen und auf die Verkehrssituation und damit auf den Testverlauf Einfluss zu nehmen. Das in [Fleck et al., 2018] veröffentlichte Konzept von Local Road Unit, siehe modifizierte Abbildung 4.6, beziehungsweise dessen Umsetzung, stützt sich auf ein Mehrkamarasystem zur Beobachtung des Kreuzunginnenraums. Mittels neuronalen Faltungsnetzen werden aus den Kameradaten Objekte detektiert, anonymisiert, im 3D-Raum verortet, zeitlich eindeutig assoziiert und verfolgt. So ist das Testsystem in der Lage, die Objekte entsprechend ihrer Dynamik und damit potentielle Kritikalität über den begrenzten Übertragungskanal wie IEEE802.11p/ETSI ITS-G5 CAM zu übertragen [Fleck et al., 2018]. Die resultierenden Objektlisten stehen nun dem Versuchsträger mit der zu testenden hochautomatisierten Fahrfunktion sowie weiteren Testteilnehmern, als ein aktueller Zustand der vorliegenden Verkehrssituation zur Verfügung.

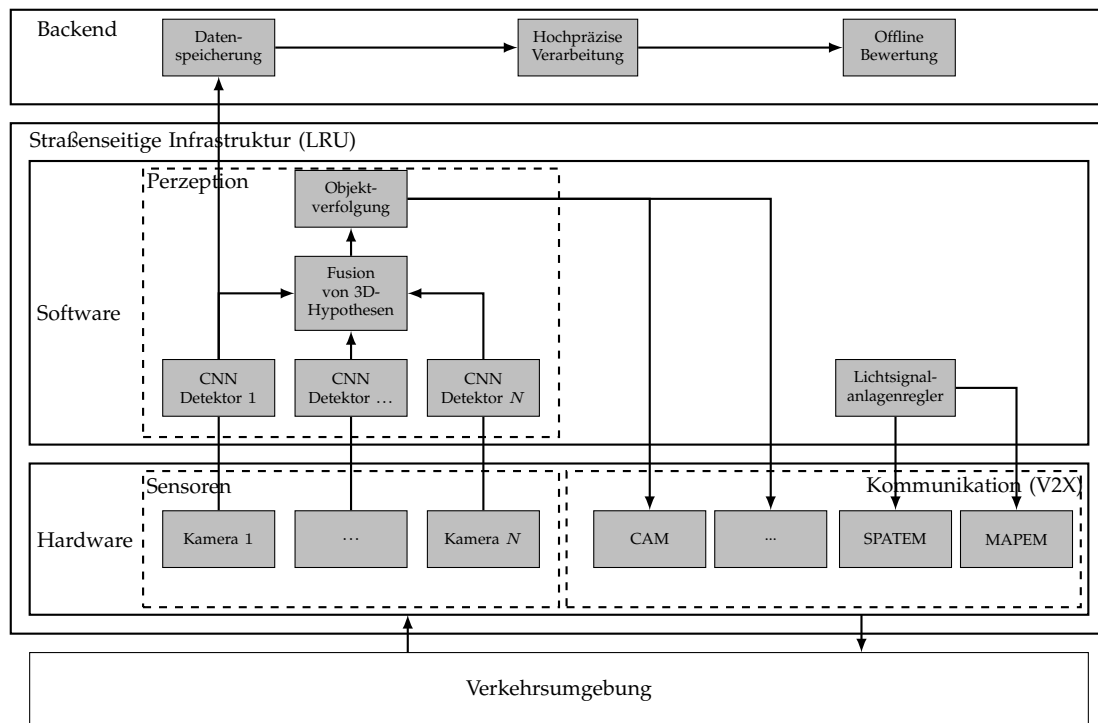


Abbildung 4.6: Systemverbund zur Erfassung, Ableitung und Kommunikation von Verkehrssituationen mit LRU. Darstellung stark modifiziert nach [Fleck et al., 2018].

Zur einheitlichen Beschreibung von Testfeldern und Prüfgeländen, insbesondere deren Fähigkeiten, wurde ein entsprechendes Modell [Zofka et al., 2022] entwickelt, siehe Abbildung 4.7a. Dieses beschreibt die Fähigkeiten anhand von vier Ebenen, entlang derer es die technologischen Bausteine mit den an das Testsystem geforderten Kriterien der Kontrollierbarkeit, der Beobachtbarkeit sowie Wiederholbarkeit der Testszenarien verknüpft und Aussagen erlaubt,



## 4.2 Abbildung von Prüfgeländen und Testfeldern in digitalen Zwilling

- a) innerhalb welcher Beobachtungsbereiche Fahrversuche generell durchgeführt werden können,
- b) die Art und Weise der Beobachtung zur Ableitung der Verhalten und Interaktionen der am Test teilnehmenden Verkehrsteilnehmer,
- c) der Vernetzung der am Test teilnehmenden Prüflinge und weiterer Verkehrsteilnehmer,
- d) und schließlich die Entitäten und Schnittstellen, mit denen aktiv in den Testprozess eingegriffen werden kann.

Hierzu wird die **erste Ebene der Szenerie** durch eine hochgenaue Karte repräsentiert. Diese beschreibt das Straßennetz, Spuren mit Fahrtrichtungen oder Freiflächen, Verkehrselemente, wie reale Straßenführungselemente, strukturelle verkehrsregelnde Elemente wie Verkehrsschilder oder Lichtsignalanlagen, sowie Gebäudefassaden. Daraus lassen sich Polygonzüge<sup>2</sup> ableiten, welche einerseits über statische Hindernisse belegbar, desweiteren reale und virtuelle Fahrzeuge befahrbar, und schließlich durch verletzbare Verkehrsteilnehmer begehbar sind. Diese werden mit aus der hochgenauen Karte abgeleiteten geometrischen Polygonzügen  $P^H = \{P^1, \dots, P^m\}$ , sowie zusätzlichen Attributen modelliert:

$$P^j := (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n), \mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^2, \text{ mit } 1 \leq i \leq n \quad (4.4)$$

Die **zweite Ebene der Referenzmesssysteme** beschreibt die Ausstattung des Prüfgeländes oder des Testfeldes mittels den Testvorgang beobachtender Referenzmesssysteme, siehe beispielsweise mittels Lidar in Abbildung 4.7c. Diese nehmen auf Basis unterschiedlichen Sensortechnologien Objekte im Umfeld des Sensors wahr. Die Referenzmesssysteme werden daher als Menge  $S = \{s_1, \dots, s_n\}$  von  $n$  Referenzmesssystemen modelliert, wobei ein Referenzmesssystem in Form des Tupels  $s_i$  charakterisiert wird:

$$s_i = (t, \mathbf{x}, m(\cdot), I, P^S), \text{ mit } 1 \leq i \leq n \quad (4.5)$$

Jedes Sensorsystem  $s_i$  wird durch ein Messprinzip  $t \in \{\text{LiDAR}, \text{RADAR}, \dots\}$  beschrieben. Die Position und Orientierung des Sensorsystems wird über eine zu einem lokalen Straßen-, Kreuzungs- oder Prüfgelände-spezifischen Koordinatensystem referenzierten Pose  $\mathbf{x}$  beschrieben. Das Sensor- und Objektdetektionsmodell  $m(\cdot)$  sowie dessen spezifischer Parametersatz  $I$  erlauben die Abbildung von Objekten aus den Sensordaten hin zu abstrakten Objektlisten. So modelliert  $I$  Azimuth- und Elevationswinkel im Falle von LiDAR oder auch Brennweiten- und Verzerrungsparameter im Falle von Kamerasensoren. Schließlich modelliert das Polygon  $P^S$  einen Erfassungsbereich, innerhalb dessen die Zustände der Test- oder Verkehrsteilnehmer mit Eigenschaften wie Position, Drehrate oder Geschwindigkeit erfasst werden. Als Referenzmesssystem kann daher auch ein fahrzeugseitig integriertes, und daher über Zeit veränderlichen Pose  $\mathbf{x}$ , GNSS/INS-basiertes Lokalisierungssystem modelliert werden.

<sup>2</sup>Berücksichtigung von Elevation erfordert komplexere Datentypen, wie bspw. Gittermodelle.

Die **dritte Ebene der Vernetzung** des virtuellen Zwillings beschreibt die Vernetzung und Kommunikation der verschiedenen Komponenten des Testsystem untereinander sowie die Einbettung des Versuchsträgers selbst in das Testsystem. Die am Test teilnehmenden, realen und virtuellen Komponenten und Teilsysteme sind entsprechend mit der zentralen Steuerungsleitstelle, und somit einer potentiell digitalen Überlagerung durch den virtuellen Zwilling, vernetzt. Hier werden hauptsächlich kabellose Kommunikationstechnologien modelliert. Dies wird durch die Menge von Kommunikationseinheiten  $R = \{r_1, \dots, r_n\}$  modelliert, wobei ein spezifischer Netzwerkknoten  $r_i$  wie folgt definiert wird:

$$r_i = (t, x, P^V) \quad (4.6)$$

Eine RSU zeichnet sich durch dem verwendeten Kommunikationsmedium  $t$  als Typ, wie IEEE802.11p, C-V2X, LTE oder 5G sowie dessen Position  $x$ , aus. Über den Typ werden somit unterstützte Nachrichtendefinitionen und -protokolle, beispielsweise ETSI ITS-G5, kodiert werden. Zusätzlich lässt sich aus Messwerten, wie der RSSI, ein Polygon  $P^V$  modellieren, welches den Bereich, innerhalb dessen eine Kommunikation zwischen Versuchsträger und der spezifischen RSU möglich ist, abbildet, siehe Abbildung 4.7d.

Die **vierte Ebene der Aktuierung** besteht aus den Verkehrselementen, die eine Verkehrs-, beziehungsweise Testsituation potentiell beeinflussen können. Daher wird diese Ebene durch eine Menge von  $n$  Aktuierungseinheiten  $A = \{a_1, \dots, a_n\}$  modelliert, wobei eine spezifische Einheit  $a_i$  beschrieben wird durch

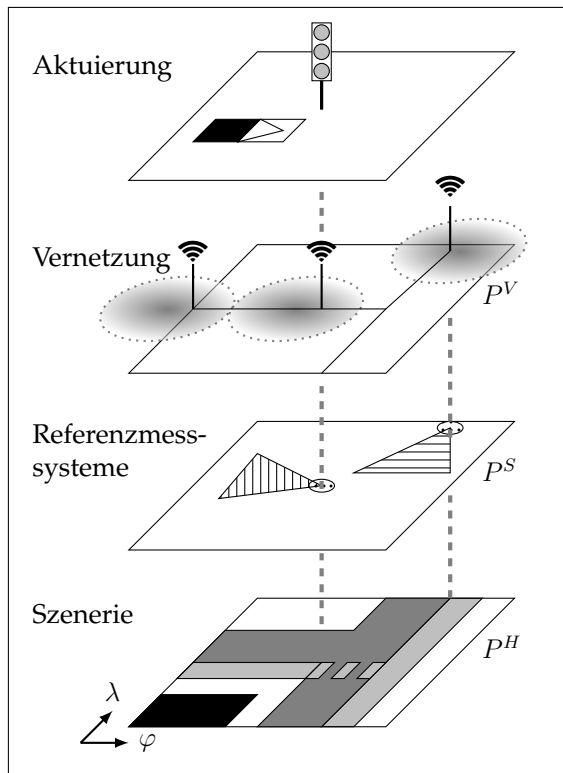
$$a_i = (t, x, v, r) . \quad (4.7)$$

Neben der Pose  $x$  des Elements modelliert  $t$  die Klasse der verkehrssteuernden oder einflussnehmenden Aktuierungseinheit, wie Hasenfahrzeuge, Fußgängerdummies, Lichtsignal- oder Bewässerungsanlagen, oder auch Schranken, siehe Abbildung 4.8. Für Aktuierungseinheiten werden Beschreibungen für das Kontrollsignal  $v$ , über welches Einfluss auf Zustände des Elements während der Testdurchführung möglich ist, sowie entsprechende Messsignale mit Grundwahrheitscharakter  $r$  vorgehalten.

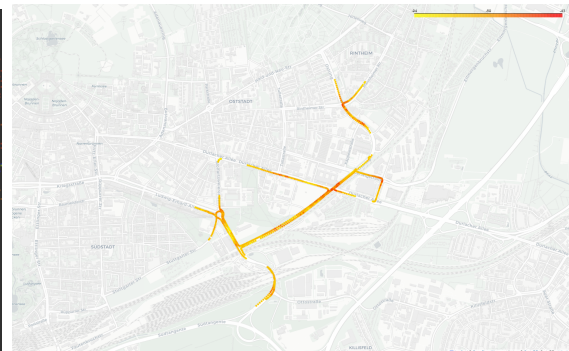
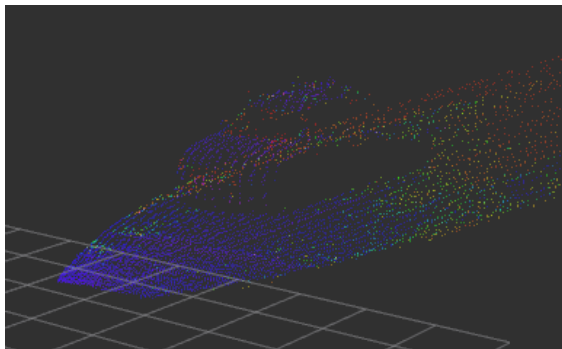
Die hochgenaue Karte, beziehungsweise  $P^H$ , gibt die durch reale und virtuelle Verkehrsteilnehmer befahrbaren und begehbaren Bereiche an. Die Modellierung der Referenzmesssysteme mit  $P^S$  komplementiert dies mit den sensoruell erfassten Beobachtungsbereichen. Die Modellierung der Vernetzung ergänzt dabei über  $P^V$  entlang welcher Straßenzüge eine Integration von realen Entitäten, wie dem Prüfling, und weiteren Akteuren über eine kabellose Kommunikation in das Testsystem möglich ist. Der resultierende Polygonschnitt  $P^{ges}$  beschreibt somit den örtlichen Raum des Testfeldes oder Prüfgeländes, innerhalb dessen eine Augmentierung stattfinden kann, siehe Abbildung 4.7a. Dieses Modell erlaubt somit eine digitale Überlagerung zu gemischt virtuell-realen Testszenarien hin zur Aktuierung und damit Einflussnahme in die Verkehrssituationen<sup>3</sup>.

<sup>3</sup>Die durch das Modell eröffnete Möglichkeit des Vergleichs von Testfeldern und Prüfgeländen ist nicht Teil der vorliegenden Arbeit und wird daher in Kapitel 6 diskutiert.

## 4.2 Abbildung von Prüfgeländen und Testfeldern in digitalen Zwilling



- (a) Modellansatz zur Fähigkeitsbeschreibung smarter Verkehrsinfrastruktur entlang von vier Ebenen. Darstellung auf Basis der Veröffentlichung [Zofka et al., 2022].
- (b) Straßenseitige Infrastruktur zur Erfassung des Verkehrsgeschehens mittels HD-Karte (gelb), Sensorik, Vernetzung und Aktuierung (rot).



- (c) Die zweite Ebene beschreibt die Konfiguration und damit Wahrnehmung der an der Infrastruktur angebrachten Sensorik, hier am Beispiel Lidar.
- (d) Die dritte Ebene charakterisiert die Vernetzung zwischen Infrastruktur und Fahrzeug mittels RSSI. Karte: © OSM-Beitragende.

Abbildung 4.7: Das Modell charakterisiert die Fähigkeiten von Testfeldern und Prüfgeländen einheitlich entlang der vier Ebenen der Szenerie, der Referenzmesstechnik, Vernetzung und Aktorik.

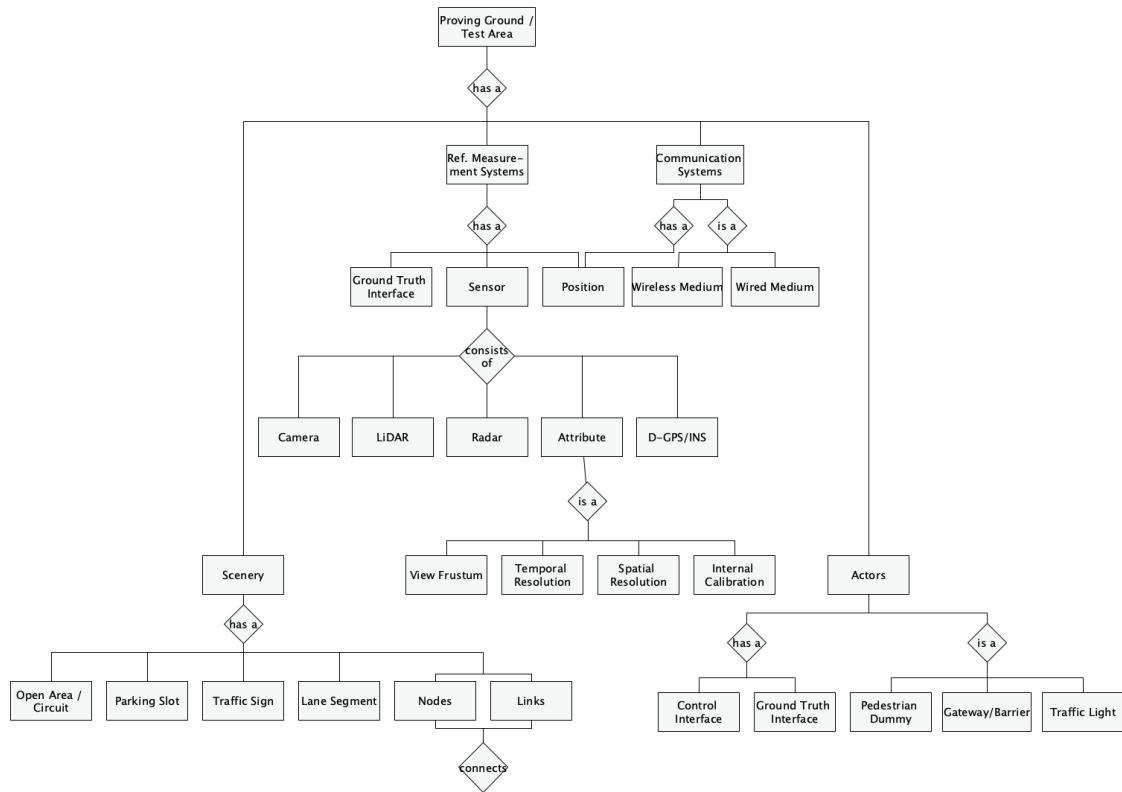


Abbildung 4.8: Begrifflichkeiten der betrachteten Elemente auf Testfeldern und Prüfgeländen. Bildquelle: [Zofka et al., 2022] © 2022 IEEE.

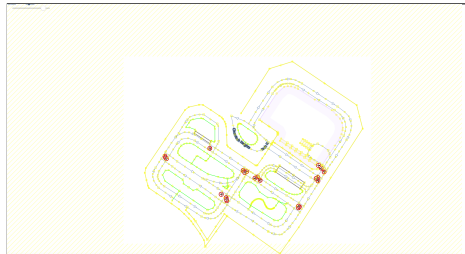
### 4.2.2 Die hochgenaue Karte als Grundlage der Augmentierung

Als Grundlage des digitalen Zwillings dient die hochgenaue Karte **H** als Referenzsystem, innerhalb dessen ein Testszenario durchgeführt werden kann. Diese entstammen der Anwendung im automatisierten Fahren für die Modellierung von a priori Wissen. Sie werden typischerweise mit hochgerüsteten Sensorträgern im Rahmen der Konzeption und des Aufbaus erfasst und schließlich zur Erprobung auf Prüfgeländen und Testfeldern kontinuierlich aktualisiert [160, 161, 158, 162]. Diese finden in der vorliegenden Arbeit zur Modellierung real virtueller Szenariebeschreibungen Anwendung als Bestandteil eines hybriden Modells mit einem Szenengraphen- und Template-basierten Ansatz. Hierfür wird auf hochgenaue, parametrische Darstellungen, auf OpenStreetMap (OSM) [258] aufbauende Darstellungen der Lanelet [118, 119] zurückgegriffen.

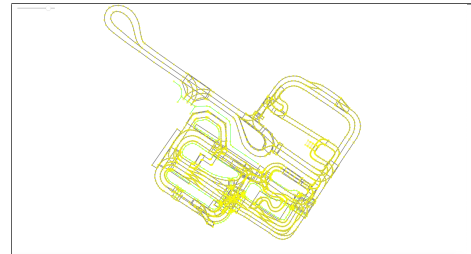
Das Datenmodell von OSM basiert auf einer parametrischen Beschreibung von geographischen Strukturen. Diese werden mittels Knoten, Linienzügen, Polygonen und Relationen zueinander modelliert, die mit zusätzlichen Attributen versehen werden können. Straßenzüge werden durch eine Abfolge von mehreren Knoten mit Attributen wie Straßennamen oder -breite modelliert. Die Referenz stellt dabei die Straßenmittellinie dar. Obgleich diese Art der Modellierung für Navigation, Routing oder Ableitung statischer Elemente genutzt werden kann,

## 4.2 Abbildung von Prüfgeländen und Testfeldern in digitalen Zwilling

eignet sie sich nicht für das automatisierte Fahren. Die Modellierung von Lanelets greift diese Elemente der Knoten, Wege und Relationen auf, um Straßenbegrenzungen und -übergänge, sowie deren Bezug zueinander abzubilden. Der befahrbare Bereich, sowie damit einhergehende verkehrliche Regeln, können damit modelliert, beziehungsweise Navigationsinformationen abgeleitet werden. Abbildung 4.9 skizziert die Ausdrucksfähigkeit und damit einhergehend Genauigkeit von OSM und Llet am Beispiel zweier Prüfgelände.



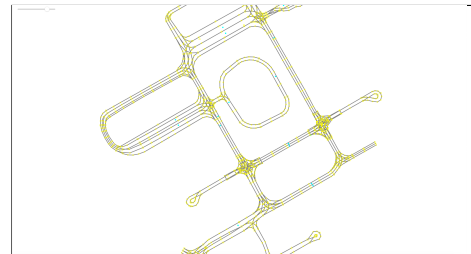
(a) CETRAN OSM-Datenmodell. © OpenStreetMap Beitragende.



(b) CETRAN Lanelet1 Modell.



(c) KIT Campus Ost OSM-Datenmodell. © OpenStreetMap Beitragende.



(d) KIT Campus Ost Lanelet1 Modell.

Abbildung 4.9: Vergleich der Modellierung mittels OSM und Llet am Beispiel der Prüfgelände Singapur CETRAN und KIT Campus Ost TAF-BW.

Poggenhans [259] benennt folgende Eigenschaften als essentiell für hochgenaue Karten:

- Längen- und Winkeltreue,
- Nachvollziehbarkeit der Informationen,
- Verknüpfung der Verkehrsregeln mit den jeweils betroffenen Fahrstreifen,
- Beobachtbarkeit möglichst vieler in der Karte enthaltener Elemente,
- Verkehrsregeln für alle Verkehrsteilnehmer,
- Informationen über die Fahrstreifen und mögliche Fahrstreifenwechsel,
- Informationen über befahrbare Flächen jenseits der Fahrstreifen sowie
- die genaue Geometrie der einzelnen Fahrstreifen.

Damit eine solche Karte als Grundlage für eine Augmentierung verwendbar ist, werden die Anforderungen an ein Modell erweitert:

1. Abbildbarkeit von Szenerieelementen aus Verkehrsumgebungen (Struktur): Reale Strukturen der Straßenführung, Verkehrslenkung und Leitinfrastruktur sollen virtuell augmentiert werden können. Hierzu wird eine Modellierung benötigt, die Objektstrukturen mit topologischen Strukturinformationen vorhalten kann.
2. Abbildbarkeit virtuell-realer konsistenter Szenenkonfigurationen (Konsistenz): Zur Abbildung der real-virtuellen Streckenführung ist es erforderlich, dass reale und virtuelle Szenenbestandteilen struktur- und lagekonsistent in Bezug zueinander gesetzt werden können.
3. Abbildbarkeit von insbes. sensorspezifischen Objekteigenschaften (Attribution): Zur Stimulation der Perzeptionskomponenten hochautomatisierter Fahrfunktionen wird die Abbildung von Objekteigenschaften für die physikalischen, umfelderfassenden Sensormodelle und damit durchzuführende Injektion benötigt.

Um Verkehrsszenarien auf Prüfgeländen und Testfeldern innerhalb des Szeneriemodellcontainers  $\mathbb{U}$  unter benannten Anforderungen instantiieren zu können, wurde ein hybrides Datenmodell, bestehend aus einer hochgenauen Kartenmodellierung  $\mathbf{H}$  und einem Szenengraphenmodell  $\mathbf{S}$ , entwickelt, siehe [Zofka et al., 2016b]. Dieses hybride Datenmodell kann damit als Tupel beschrieben werden:

$$\mathbb{U} := (\mathbf{S}, \mathbf{H}) \quad (4.8)$$

Die hochgenaue Karte  $\mathbf{H}$  modelliert über die Streckenzüge, sowie befahr- und begehbbare Bereiche das geometrische Bezugssystem mit topologischen Relationen des Testfeldes oder Prüfgeländes. Es bildet somit die Grundlage für die statische Verkehrsszenarie und die Bewegung der Verkehrsobjekte. Die Verknüpfung der Elemente des Szenengraphen mit der hochgenauen Karte erlaubt eine Verortung auf einem erdfesten, sphärischen Koordinatensystem und somit Inbezugsetzung zu den realen Gegebenheiten des Testfelds oder Prüfgeländes.

Das Szenengraphenmodell  $\mathbf{S}$  stellt eine objektbezogene Sicht auf die in der Szene enthaltenen statischen Verkehrsobjekte und später zeitlich-veränderlichen Verkehrsobjekte dar. Hierarchisch angeordnete Knoten im Szenengraphen modellieren dabei über entsprechende Transformationen die räumlich und logische Beziehung der Verkehrsobjekten zueinander und gruppieren diese gegebenenfalls semantisch über Teilbaumstrukturen, die wie in [260] als real, virtuell oder augmentiert charakterisiert werden. Neben Objekteigenschaften, wie der Klassifikation oder den geometrischen Abmessungen, erlaubt  $\mathbf{S}$  die Modellierung der Gestalt oder sensorspezifische Eigenschaften über Skalare, geometrische Primitive bis hin zu komplexen CAD-Modellen.

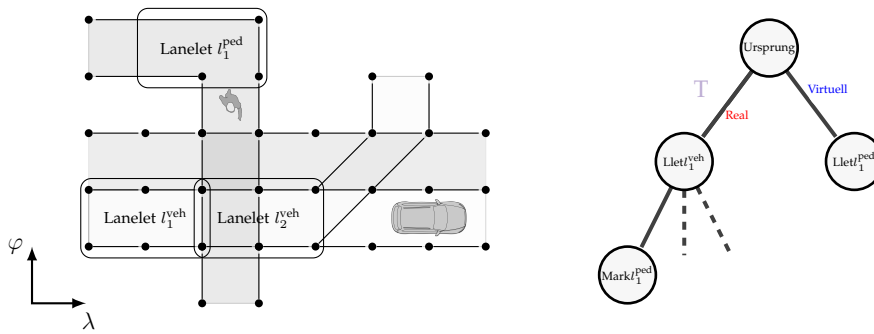
Die Annahme einer geschlossenen Welt für die zu modellierenden Verkehrsszenarien erlaubt die Abbildung der dadurch spezifizierten Welt auf sogenannte

## 4.2 Abbildung von Prüfgeländen und Testfeldern in digitalen Zwilling

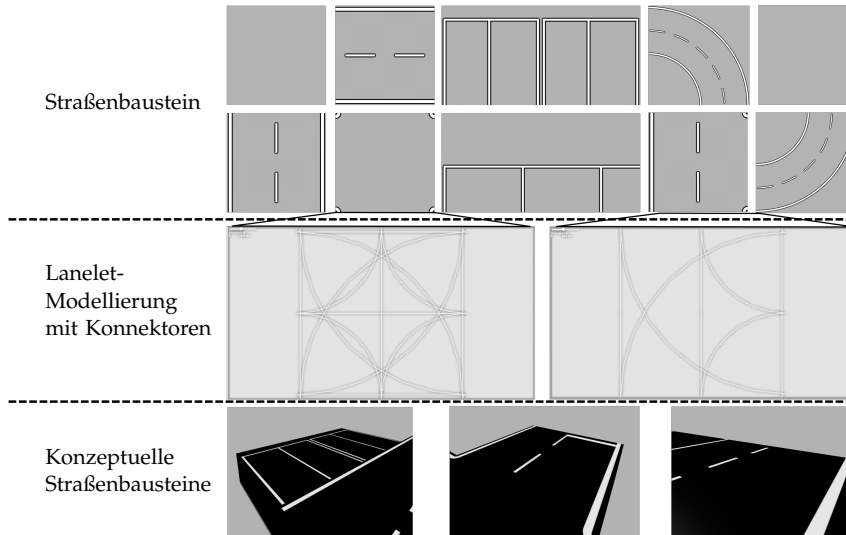
Schablonen (engl.: „*template*“). Eine Schablone  $\mathcal{T}$  stellt die Struktur, eine explizite Darstellung der hochgenauen Karte mit objektbezogenen Attributen, die Verknüpfbarkeit untereinander sowie die Attributierung mit sensorspezifischen Eigenschaften dar. Sie lässt sich wie folgt formalisieren:

$$\mathcal{T} = (\mathbf{x}, g(\cdot), s(\cdot), l, d) \quad (4.9)$$

Die Schablone  $\mathcal{T}$  beschreibt ein Szenerieelement mit einer zweidimensionalen Pose  $\mathbf{x}$ , einer gestaltbeschreibenden Funktion  $g(\cdot)$ , beispielsweise in Form eines CAD-Modell, und einer Funktion  $s(\cdot)$  zur Beschreibung sensorspezifischer Eigenschaften, beispielsweise örtlich variierender Reflektanzcharakteristika. Die Verknüpfbarkeit zwischen benachbarten Schablonen wird über die Konnektoren  $d$  modelliert. Der Schablonentyp  $l$  spiegelt den Typ des Szenerieelements wider, wie  $l \in \{\text{straight, curve, stop sign, traffic light, } \dots\}$ .



(a) Hybrider Modellierungsansatz durch Verknüpfung hochgenauer, georeferenzierter Karten mit metrisch referenzierten Szenengraphen.



(b) Implizite Verknüpfung der hochgenauen Karte mit Elementen des Szenengraphen mittels Schablonenelementen.

Abbildung 4.10: Augmentierung der Verkehrsszenerie erfolgt über Szenerieschablonen. Diese ergänzen eine initial vorliegende hochgenaue Karte nebst Szenengraphen des Prüfgeländes oder Testfeldes.



Abbildung 4.10 skizziert das hybride Modell: Abbildung 4.10a zeigt eine beispielhafte Verkehrsszene einer zweistreifigen Straße auf, die mit einem kreuzenden, virtuellen Fußgängerüberweg im hybriden Lanelet- und Szenengraphenmodell augmentiert wird. Abbildung 4.10b zeigt den Aufbau der Schablonen mit gestaltbeschreibender Funktion und entsprechenden Konnektoren auf. Diese modellieren Übergangspunkte und damit valide Konfigurationen aneinander liegender, benachbarter Schablonen und ermöglichen somit die Wahrung der Struktur- und Lage-, und damit Szenenkonsistenz.

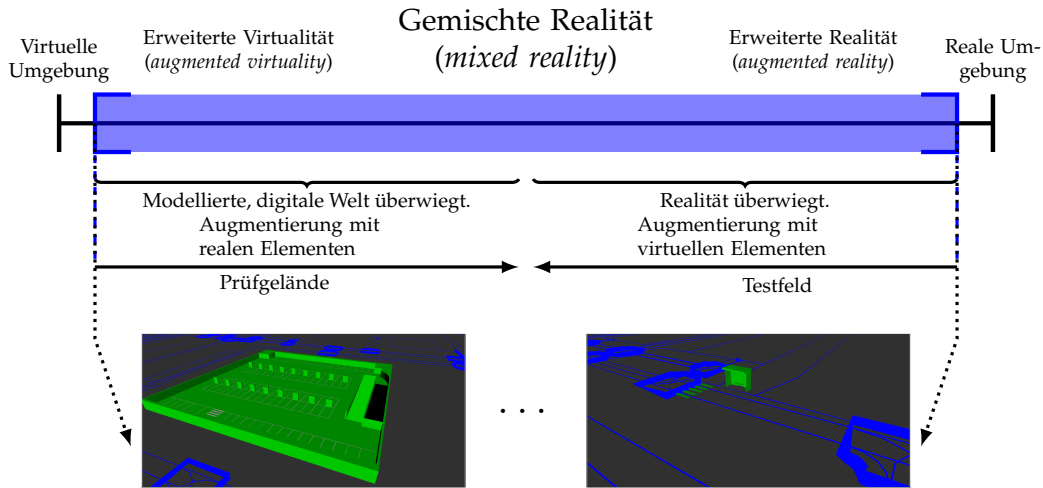


Abbildung 4.11: Augmentierung von Verkehrsszenarien: starkes (links) und schwaches Augmentierungsmodell (rechts). Basisszenarie des digitalen Zwillings (blau) und Augmentierungsmodelle (grün).

Die Flexibilität einer gegebenen und anvisierten Szenerie folgt aus dem Katalog von Szenerieelementen [Zofka et al., 2016b]. Dieser Katalog wiederum ergibt sich dabei aus einer Dekomposition von Testfeldern und Prüfgeländen wie auch der abzubildenden Szenerie aus den Testanforderungen. Dabei kann entsprechend eine Einheitsgröße eines Standardelements unter Berücksichtigung dieser Anforderungen zwar frei, jedoch, einheitlich zur Wahrung der Konsistenz, gewählt werden. Dann kann ein initiales Szeneriemodell  $\mathbb{U}$  mit hochgenauer Karte  $H_0$  und Szenengraphmodell  $S_0$  mit eben diesen Modellen des Schablonenkatalogs durch Ersetzung einzelner Elemente augmentiert werden.

Diese Art der Modellierung erlaubt somit die Abschätzung eines Grads der Augmentierung zwischen Realität und Virtualität einer vorliegenden Verkehrsszenarie. Ein initiales Szeneriemodell eines Testfeldes oder Prüfgeländes sei über die Anzahl der darin verkörperten Standardschablonen  $n$  beschrieben. Über eine Augmentierung werden dann Elemente  $m$  Standardschablonen ersetzt, beziehungsweise verändert. Dann ergibt sich der Augmentierungsgrad  $\zeta$  mit  $\zeta: S \mapsto [0, 1]$  eines Verkehrsszenariemodells  $\mathbb{U}$  aus der Anzahl angepasster Schablonen  $m$  im Szenengraph  $S$  zu

$$\zeta(s) = 1 - \frac{m}{n} \quad . \quad (4.10)$$



Abbildung 4.11 zeigt zwei gegensätzliche Augmentierungen auf: Die Augmentierung eines Freifelds mit einem Parkhaus (Abb. 4.11 links) stellt exemplarisch die Augmentierung eines schwachen Basis- mit einem starken Augmentierungsmodell der Szenerie dar und lässt sich über den Grad  $\zeta_p$  charakterisieren. Die Augmentierung eines Streckenverlaufes mit Fußgängerüberweg und Haltestelle (Abb. 4.11 rechts) stellt die Augmentierung eines starken Basis- mit einem schwachen Augmentierungsmodell dar und lässt sich über  $\zeta_f$  bewerten. Beide Augmentierungen lassen sich somit zueinander in Beziehung setzen:

$$0 < \zeta_p \ll \zeta_f < 1 \quad (4.11)$$

### 4.2.3 Referenzmesssysteme zur Bewertung augmentierter Szenarien

Referenzmesssysteme innerhalb der zweiten Ebene des Fähigkeitenmodells und digitalen Zwillings erlauben die Beobachtung und Verfolgung des Testverlaufs. Sie erlauben die Auswertung der Messgrößen mittels Metriken und stellen daher ein Mess- und Bewertungswerkzeug dar. Für die Entwicklung erweiterter Fahrerassistenzfunktionen wurden Referenzmesssysteme, insbesondere für Lokalisation- und Objekterkennung erforscht und entwickelt. So werden in [261, 262] Anforderungen an ein Referenzsystem für die GPS-basierte Fahrzeugortung gestellt, mittels Anwendung des Guide of Uncertainty in Measurement (GUM) [263] zur Bestimmung der Unsicherheit erweitert und über in den Straßenverlauf eingelassene Permanentmagneten und einer automatisierten Spurführung appliziert und validiert. Während der ursprüngliche Fokus auf der Fahrzeugortung lag, wurde dies in [264, 34] auf die Umgebungswahrnehmung von Objekten zu einem Bezugsfahrzeug relativ erfassten Messgrößen übertragen.

Ihre Legitimation als Bewertungsbasis beziehen Referenzmesssysteme dabei jeweils aus ihren Eigenschaften, wie einer aufgrund eines präziseren physikalischen Erfassungsprinzips zeitlich oder örtlich feineren Auflösung. Dies kann aber auch auf eine numerisch aufwendigere, rechen-intensivere und damit exaktere Datenverarbeitung zurückgeführt werden. Weitere Kriterien, die für diese Legitimation herangezogen werden können, führt Brahmi in [264] auf: Szenenabdeckung, Mobilität, Sichtbereich, Messfrequenz und Messgenauigkeit sowie Wahl der Zeitbasis. Einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Erfassung hat dabei die Anbringung des Referenzmesssystems im Verkehrsgeschehen selbst. So werden Referenzsysteme nach [35] bezüglich der Anbringung am Versuchsträger selbst, an anderen Verkehrsteilnehmern sowie nicht aktiv selbst am Verkehrsgeschehen teilnehmenden Objekten, wie Drohnen, Helikoptern oder auch stationären Verkehrseinheiten klassifiziert.

Diese stationären Verkehrseinheiten kommen dabei auf Prüfgeländen und Testfeldern zum Einsatz, um den Zustand des Versuchsträgers – oder im Falle mehrerer zu erprobender Versuchsträger – mit der hochautomatisierten Fahrfunktion zu erfassen. Dies wird innerhalb des Beobachtungsvektors  $x$  zusammen-

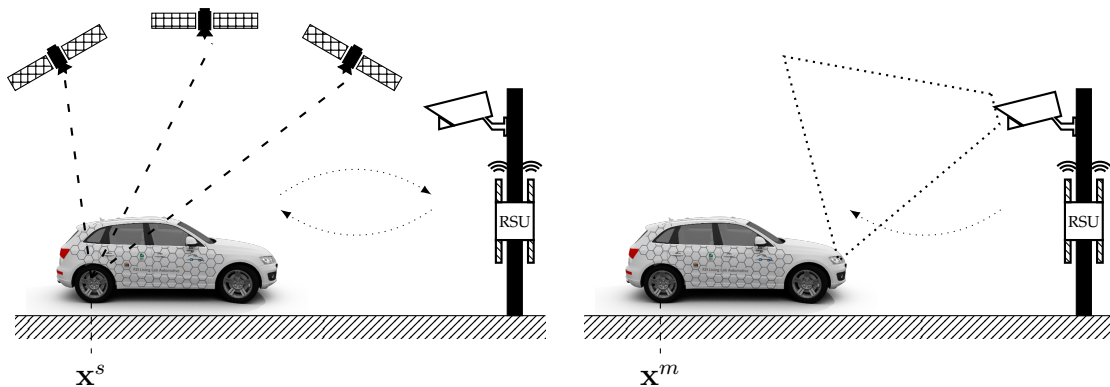
gefasst, der neben einer metrischen Fahrzeugposition  $x, y$  und der Fahrzeugorientierung  $\phi$  zu einem Beobachtungszeitpunkt  $t$  verzeichnet. Dies kann um die Longitudinal- und Lateralgeschwindigkeiten  $v_x, v_y$  und gegebenenfalls a priori bekannte Fahrzeugabmaße  $l, b$  ergänzt werden. Der Beobachtungsvektor  $\mathbf{x}_t$  bezogen auf einen Verkehrsteilnehmer  $\epsilon$  zum Zeitpunkt  $t$  der Testdurchführung ergibt sich somit zu

$$\mathbf{x}_\epsilon^t = (x, y, \phi, v_x, v_y, l, b)^T \quad (4.12)$$

Die Assoziation der Beobachtungen hinweg erlaubt die Zuweisung eines eindeutigen Schlüssels und damit zeitliche Verfolgung der Zustände. Somit lässt sich eine Referenztrajektorie  $\mathbf{T}$  des Fahrzeugs aus den verknüpften Beobachtungsvektoren als Darstellung des betrachteten Verhaltens für das Fahrzeug  $\epsilon$  ableiten:

$$\mathbf{T}_\epsilon = (\mathbf{x}_\epsilon^0, \dots, \mathbf{x}_\epsilon^{n-1}) \quad (4.13)$$

Abb. 4.12 zeigt zwei gegensätzliche Ansätze zur Beobachtung des Fahrzeugverhaltens auf: Bei der **fahrzeuggebundenen Lokalisierung** wird der Beobachtungsvektor  $\mathbf{x}_r^s$  mittels der fahrzeugseitig verbauten GNSS/INS-Lösung erfasst. Daraufhin wird der Beobachtungsvektor über die Funkstrecke an die straßeninfrastrukturseitig angebrachten Komponenten kommuniziert. Innerhalb dieser findet eine Konvertierung des Beobachtungsvektors  $\mathbf{x}_r^s$  in ein metrisches Koordinatensystem statt, welches zu einem lokalen Punkt referenziert ist. Es resultiert  $\mathbf{x}_r^m$ . Bedarfsabhängig findet eine Rückübermittlung des Beobachtungsvektors an weitere am Test beteiligte Verkehrsteilnehmer statt. Bei einem **infrastrukturbasierten Referenzmesssystem** wird der Beobachtungsvektor  $\mathbf{x}_r^m$  zumeist in einer metrischen Positionierung direkt in der Infrastruktur erfasst. Es wird dann eine Konvertierung in ein globales, sphärisches Koordinatensystem  $\mathbf{x}_r^s$ , wie in WGS84, und die Angabe einer Orientierung in einem Tangentialsystem (NED,...) vorgenommen und an weitere Akteure des Tests verteilt.



(a) Interne Lokalisierung mittels bordeigener, im Fahrzeug integrierter Sensorik. (b) Externe Lokalisierung mittels von in der Infrastruktur angebrachter Sensorik.

Abbildung 4.12: Unterscheidung einer internen und externen Fahrzeugortung als Referenzmesssystem für Fahrzeugposition und -orientierung.

Die Lokalisierungsinformation kann mittels Vorwärts- und Rückwärtsprojektion zwischen einem lokalen kartesischen und einem globalen sphärischen Koordinatensystem konvertiert. Dies basiert auf der Annahme, dass sich die Erdkugel als ein Ellipsoid darstellen lässt. Eine Transformation der globalen, sphärischen Koordinaten in kartesische, lokale Koordinatensysteme mit  $\mathbf{p} = (x, y)^T \in \mathbb{R}^2$  unterliegt jedoch den jeweiligen, den Abbildungsvorschriften zugrundeliegenden Annahmen. Diese schlagen sich in Projektionsfehlern nieder, die – je nach Abbildung – mit steigender Distanz zu einem gegebenen Referenzpunkt  $\mathbf{p}_0$  ansteigen können. Zu diesem Zweck können diverse Projektionsverfahren verwendet werden, wie die sphärische Mercator-Projektion [265]. Unter Berücksichtigung eines angenommenen Erdradius von  $r = 6.378.137$  km und des Skalierungsfaktors  $k_0 = \cos \varphi_{ts}$  ergibt sich die Vorwärtsprojektion eines Punktes  $\mathbf{p}_0$  zu

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = k_0 \cdot r \cdot \begin{pmatrix} \lambda \\ \ln \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

Entsprechend kann eine Rückprojektion definiert werden [265].

Beide Ansätze zeichnen sich durch unterschiedliche Mess-, Verzögerungs- und Übertragungszeiten der Daten aus, die jeweils bei der Lokalisierung und der Beurteilung des Testergebnisses zu berücksichtigen sind, siehe Tabelle 4.2.

Kriterien	Fahrzeuggebundene Lokalisierung	Infrastrukturbasierte Lokalisierung
Signallaufzeit $t_g$	$t_{gps} + t_{comm} + t_{comm}$	$t_{infra} + t_{comm}$
Situative Einschränkung	nicht in geschlossenen Räumen anwendbar	Tunnel, Häuserschluchten, Parkraum über entsprechende Ausrüstung möglich
Sonstige Kriterien	reduz. auf Erfassung unter freiem Himmel	reduziert auf Erfassungsbereich des Sensors

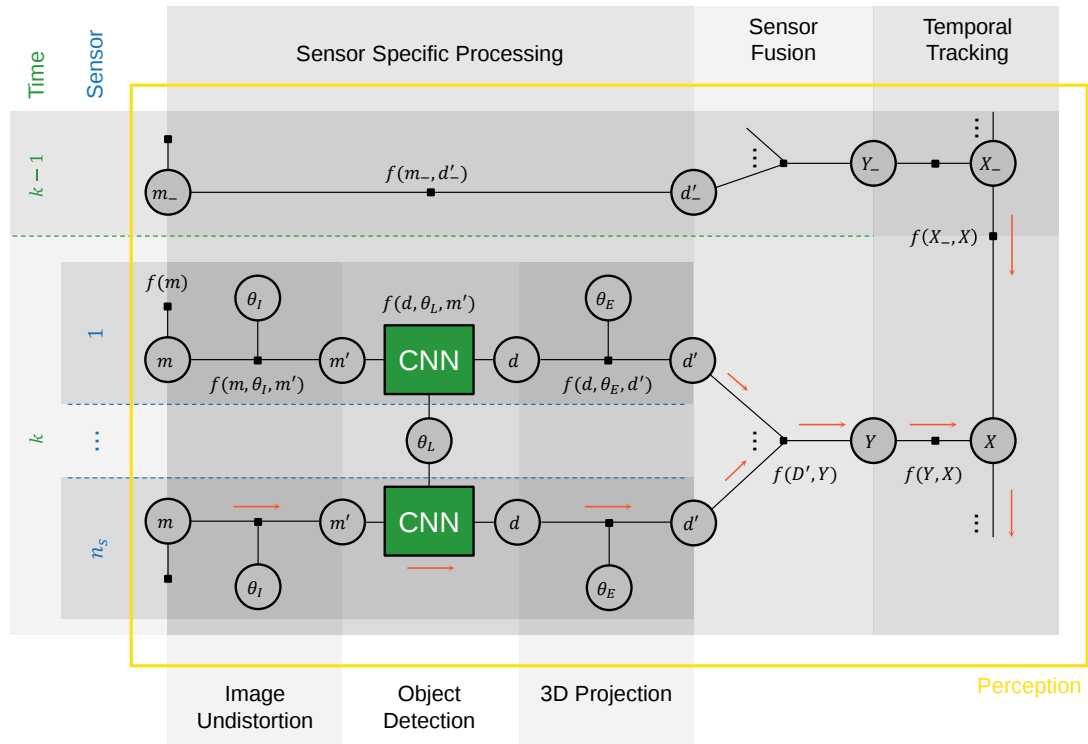
Tabelle 4.2: Quantitativer Vergleich der Lokalisierungsbestimmung.

Im Rahmen der zugrundeliegenden Forschungsarbeiten wurde auf dem TAF-BW ein auf Multikamera-Systemen basierendes, infrastrukturseitig angebrachtes Referenzmesssystem entwickelt und prototypisch umgesetzt<sup>4</sup>. Die Ortungsaufgabe wurde dabei in [Fleck et al., 2018] als ein Schätzproblem unbekannter Zustände der Objektliste  $X$ , gegeben die Sensormessungen mit den Unsicherheiten  $M$  und dem Hintergrundwissen  $\theta$ , formuliert. Als Hintergrundwissen  $\theta$  werden Parameter der intrinsischen und extrinsischen Kalibrierung, wie auch der Detektionsalgorithmen herangezogen:

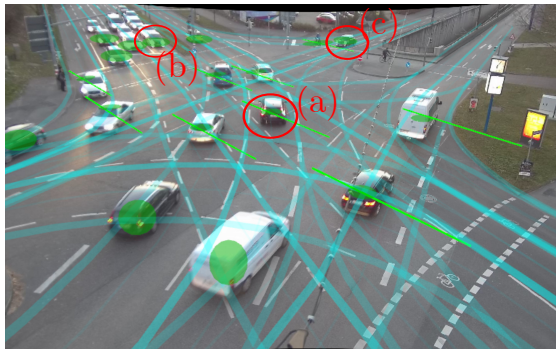
$$X \sim P(X|M, \theta) \quad (4.15)$$

Abbildung 4.13 zeigt die Formulierung der Verarbeitungskette auf Basis von Faktographen auf. Die aus verschiedenen Positionen erfassten Kamerabilder liefern jeweils über tiefe neuronale Netze, wie Mask R-CNN [266] in [Fleck et al., 2018] oder auch YOLOv3 [267, 268] in [Fleck et al., 2020], Hypothesen  $D = \{d^1, \dots, d^{ns}\}$  für die Posen der Verkehrsteilnehmer.

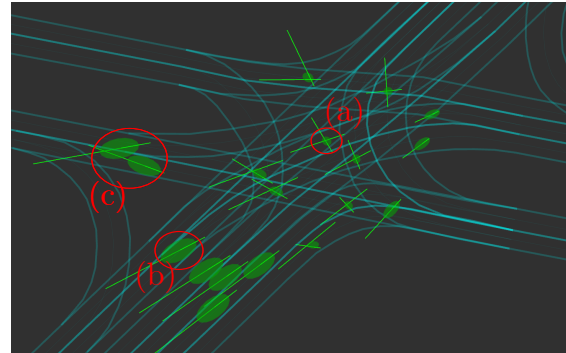
<sup>4</sup>Über den Beitrag zur vorliegenden Arbeit hinausgehende Detaillierungen finden sich in den Publikationen [Fleck et al., 2018, Fleck et al., 2020, Zipfl et al., 2020, Fleck et al., 2022].



(a) Konzept eines infrastrukturbasierten Referenzmesssystems zur Bestimmung der Verortung von Verkehrsteilnehmern. Die Detektionen eines neuronalen Faltungsnetzes werden in den 3D-Raum rückprojiziert und zeitlich verknüpft.



(b) Die Online-Detektion von Verkehrsteilnehmern als Hypothesen  $D$  findet über tiefe neuronale Netze statt.



(c) Darstellung der Hypothesen  $D^i$  projiziert auf die hochgenaue Karte  $H$  der Kreuzung.

Abbildung 4.13: Verarbeitungskette der TAF-BW Verkehrsinfrastruktur zur Ableitung von Objektlisten durch Zuordnung und Fusion (Schnittgerade mit hochgenauer Karte (grüne Liniensegmente) und Unsicherheiten der Messungen (grüne Ellipsen). Beispielhafte Fälle: Erfolgreiche Fusion zweier Kamera-Messungen (a). Objekt wird ausschließlich von einer Kamera erfasst, es findet keine Fusion statt (b). Kameras haben das Objekt zwar erkannt, aufgrund zu weit entferntem Schnitt findet jedoch keine Fusion statt (c). Bilderquelle: [Fleck et al., 2018]. Mit freundlicher Genehmigung von Springer Nature.

## 4.2 Abbildung von Prüfgeländen und Testfeldern in digitalen Zwilling

In [Fleck et al., 2020] wird dies für einen Algorithmus zur Verfolgung von Detektionen im Bildraum der Kamerasensordaten ausgeführt. Mittels einer Rückprojektion in den 3D-Raum werden diese Hypothesen mithilfe des Vorwissens über die Kalibrierparameter sowie verschiedener Sichtbereiche der Kameras miteinander zu den 3D-Messungen  $Y$  fusioniert. Aus diesen werden über die Beobachtungsdauer hinweg weitere situations- und fahrzeugbeschreibende Zustandsgrößen, wie Geschwindigkeiten oder Beschleunigungen, in eine Objektliste  $X$  zu jedem Zeitpunkt  $t$  abgeleitet.

$$X^t = \{\mathbf{x}_1^t, \mathbf{x}_2^t, \dots, \mathbf{x}_n^t\} \quad (4.16)$$

Die mittels Infrastruktur erfassten Objektlisten  $X_{\text{real}}^t$  können nun mit den Signalen weiterer stationärer Verkehrsinfrastruktur  $L_{\text{real}}^t$ , beispielsweise mit Zuständen von Lichtsignalanlagen oder Geschwindigkeitswechsellanzeigen, oder Posen weiterer virtueller Verkehrsteilnehmer  $X_{\text{virtuell}}^t$  aus dem digitalen Zwilling zueinander in Bezug gesetzt werden. Für diese Zustände wird die Grundwahrheitseigenschaft angenommen:

$$X_{\text{ges}}^t = X_{\text{real}}^t \cup X_{\text{virtuell}}^t \cup L_{\text{real}}^t \quad (4.17)$$

Zustandssignale von Lichtsignalanlagen in Testfeldern [60] können in Form der ETSI ITS-G5-Datenpakete SPATEM und MAPEM kodiert und über Funk übermittelt werden. Dabei lassen sich mittels MAPEM geometrische und topologische Bezüge innerhalb einer Kreuzung modellieren, siehe Abbildung 4.14c, die mittels SPATEM um Lichtsignalphasen ergänzt werden. Über entsprechende Inbezugsetzung zwischen MAPEM und SPATEM, siehe Tabellen 4.14a und 4.14b, lassen sich daraus die Lichtsignalphasen auf Kreuzungsübergänge beziehen. Die resultierende Objektzustandsmenge  $X_{\text{ges}}^t$  gibt nun also in einem metrischen, lokal referenzierten Koordinatensystem die jeweiligen zum Zeitpunkt  $t$  gültigen Posen der Verkehrsteilnehmer sowie Zustände der am Test beteiligten Lichtsignalanlagen kreuzungsübergangsbezogen an.

track id	frame	time	type	x	y	vx	vy	psi	l	w
0	3	0	Car	-16.42	-37.78	0.00	0.00	0.00	2.5	1.5
0	4	100	Car	-16.40	-37.78	-0.23	-0.03	0.00	2.5	1.5
0	5	200	Car	-16.36	-37.75	-0.38	-0.33	0.00	2.5	1.5
0	7	300	Car	-16.35	-37.73	-0.11	-0.18	0.00	2.5	1.5
0	8	400	Car	-16.37	-37.74	0.24	0.12	0.00	2.5	1.5
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

id	signal group id	time	state
0	1	0	RED
1	1	1000	RED
2	1	2000	RED
3	2	0	GREEN
4	2	1000	GREEN
.	.	.	.
.	.	.	.

- (a) Mittels Infrastruktur wahrgenommene Objektlisten und -trajektorien. (b) Mittels IEEE802.11p / ETSI ITS-G5 erfasste Phasenwechsel.

```

<Document>
  <name>k733_map.kml</name>
  <Folder>
    <name>Intersection 5678</name>
    <Placemark>
      <name>RefPoint</name>
      <Point>
        <coordinates>
          8.43692940000000036,49.00507129999999734,0.000000
        </coordinates>
      </Point>
    </Placemark>
    <Placemark>
      <name>Lane 1</name>
      <LineString id="Lane_1">
        <coordinates>
          8.43769979984849172,49.00537348191863884,6.000000
          8.43807526003106823,49.00557334673142407,6.000000
          8.43838130740678771,49.00573613621648406,6.000000
          8.43874524451472041,49.00592421251487707,6.000000
          8.43892906499140416,49.00602203018776493,6.000000
        </coordinates>
      </LineString>
      <ExtendedData>
        <Data name="Source">
          <value>1</value>
        </Data>
        <Data name="Sink">
          <value>46, 64, 63</value>
        </Data>
        <Data name="SignalGroup">
          <value>1, 2, 2</value>
        </Data>
      </ExtendedData>
    </Placemark>
    [...]
  </Folder>
</Document>

```

(c) Auszug einer KML-formatierten Darstellung einer ETSI ITS-G5 MAPEM.

Abbildung 4.14: Mess- und Zustandsgrößen der Objektlisten, Lichtsignalanlagenphasen und lokalen Kreuzungs- und Kreuzungsübergangskarten. Quelle: Veröffentlichung [Zipfl et al., 2020] © 2022 IEEE und frei verfügbarer TAF-BW-Datensatz [Fleck et al., 2020].

Da diese Koordinatensysteme für die Bestimmung von Kritikalitätsmetriken ungeeignet sind, werden die Positionen realer und virtueller Verkehrsteilnehmer auf ein gemeinsames Straßenkoordinatensystem bezogen. Zur Beurteilung des Fahrverhaltens werden situationsbewertende Metriken verwendet, die über das zu beobachtende Verhalten eine umfassende Bewertung des hochautomatisierten Fahrsystems sowie Rückschluss auf die Performanz einzelner Komponenten erlauben, wie Time-Headway (THW) oder auch der Time-to-Collision (TTC).

Die TTC nutzt hierbei zeitlich aufeinander folgende Beobachtungen innerhalb des Testsystems, um die Szenenkritikalität zwischen zwei Verkehrsteilnehmern  $\epsilon_1$  und  $\epsilon_2$  unter Berücksichtigung ihres longitudinalen Abstands entlang einer Referenzspur  $d$  und den jeweiligen Geschwindigkeiten  $v_{\epsilon_1, \epsilon_2}$  zu modellieren. Um verschiedene Straßenführungen zu berücksichtigen, kann auf ein mit der Straße mitgeführtes Frenet-Koordinatensystem zurückgegriffen werden:

$$\text{TTC}_{\epsilon_1, \epsilon_2} = \frac{d_{\epsilon_1, \epsilon_2}}{v_{\epsilon_1} - v_{\epsilon_2}} \quad (4.18)$$

## 4.2 Abbildung von Prüfgeländen und Testfeldern in digitalen Zwilling

Zur Bewertung der Durchführung in einem nachgelagerten Schritt wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit in [Töttel et al., 2021] die Visualisierung eines Space Time Cube nach [269] auf die Analyse von Verkehrssituationen in einer Virtual Reality Umgebung adaptiert. Dies erlaubt so einem Testingenieur die verständliche, visuelle Interpretation der Interaktionen der am Test beteiligten Verkehrsteilnehmern innerhalb eines Replay-basierten Tools. Die freie Bewegung und Darstellung im 3D-Raum erlauben dabei die räumliche Analyse ihres Verhaltens hinsichtlich räumlicher, zeitlicher, so aber auch räumlich-zeitlicher Dimensionen. So wird das Verhalten, wie die Nähe der Objekte zueinander oder der jeweiligen Geschwindigkeiten als Steigungen, visualisiert, siehe Abbildung 4.15.

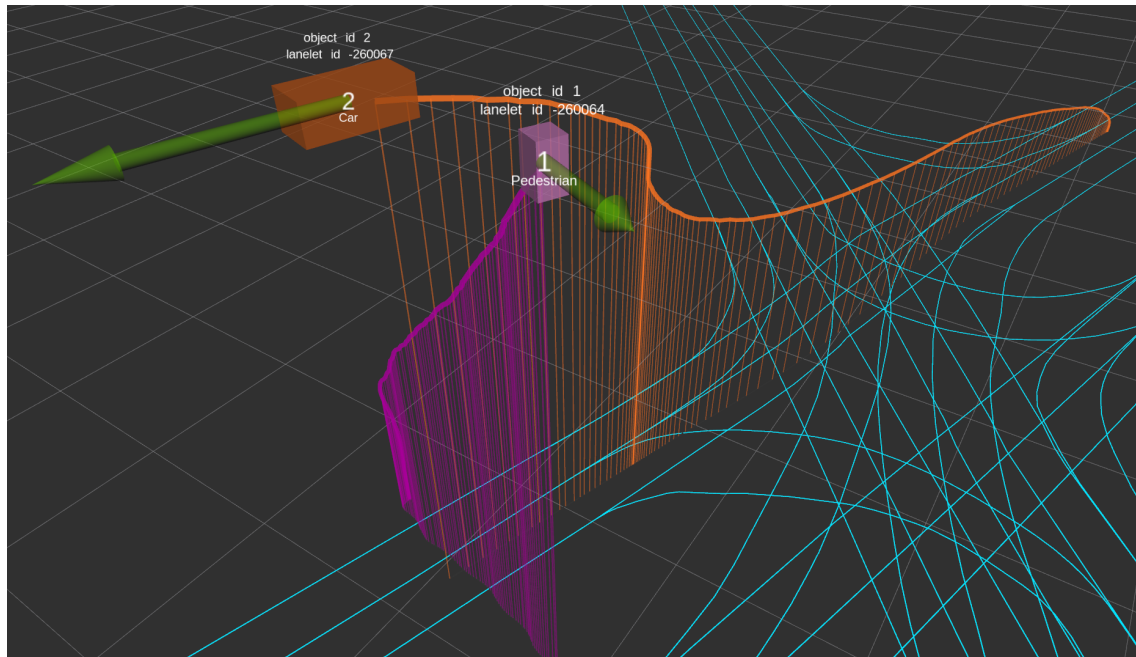


Abbildung 4.15: Die Visualisierung der Verkehrssituation erlaubt eine intuitive Einschätzung der beobachteten Situation auf dem Testfeld. Bildquelle: [Töttel et al., 2021]. Mit freundlicher Genehmigung von Springer Nature.

## 4.3 Abbildung von Verkehrsteilnehmern auf virtuell erweiterte Testfelder

Mittels der im vorherigen Kapitel 4.2 erarbeiteten Modellierung ist man nun in der Lage, die real vorherrschenden, straßenbaulichen Gegebenheiten des Testfelds oder Prüfgeländes mit virtuellen Szenerieelementen zu ergänzen. Diese augmentierte Abbildung im digitalen Zwilling dient somit als Basis, um die Szenarien mit Verkehrsteilnehmern, im Speziellen deren Gestalt, Aussehen und Verhalten, zu augmentieren. Gestalt und Aussehen werden dazu über entsprechende Avatare in den Szenengraphen integriert, der wiederum als Schnittstelle für die Injektion im folgenden Kapitel dienen. Die Skalierbarkeit zwischen modellgetriebener bis hin zu datengetriebener Erfassung und Abbildung von Verhaltensmustern wird durch den Verhaltensmodellcontainer  $\mathbb{V}$  modelliert.

Die in Abschnitt 3.3 postulierten Anforderungen zur Exposition der automatisierten Fahrfunktion gegenüber skalierbaren, vulnerablen Verkehrsteilnehmern werden in Abschnitt 4.3.1 auf das Milgram-Kontinuum bezogen. So sollen vielfältigste Interaktionen zwischen den Verkehrsteilnehmern und automatisierten Fahrzeugen in Norm- und Grenzfällen, wie regelwidriges und damit nicht vorhersehbares Verhalten erprobbar und absicherbar gemacht werden. Die flexible und skalierbare mittels datengetriebene Ansätze wird in Abschnitt 4.3.2 aufgezeigt. Anschließend wird in Abschnitt 4.4 der Zusammenhang mit den Injektionschnittstellen aus dem Modellcontainer  $\mathbb{I}$  erläutert.

### 4.3.1 Skalierung zwischen modellbasierten und datengetriebenen Methoden

Im Folgenden wird die Integration von Verkehrsteilnehmerverhalten in digital erweiterte Testfelder auf das Milgram-Kontinuum zwischen Realität und Virtualität bezogen. Dieser Bezug erlaubt, bedarfsgerecht aus den Anforderungen an das Testsystem, eine passende Konfiguration innerhalb dieses Kontinuums zu instanziiieren. Diese Anforderungen können verschiedener Natur sein: So können die zu berücksichtigenden Aspekte beispielsweise das menschliche Handeln im Norm- oder Grenzfall, die Art und Weise der Körperbewegung durch reine Bewegung des Körpers, der Körpergelenke (Gestik) oder Gesichtsmuskeln (Mimik) betreffen. Andere Kriterien sind der notwendige Grad des Realismus oder auch die Automatisierbarkeit von Tests auf dem Prüfgelände und spielen dabei eine wesentliche Rolle bei der Wahl der adäquaten Instanz aus dem Kontinuum. Eine sukzessive Instanziierung von virtuellen Simulationsmodellen<sup>5</sup> zu immersiven Probanden als verletzte Verkehrsteilnehmer entspricht damit der Einbindung von Expertenmodellen bis zu Steuergeräten innerhalb des X-in-the-loop-Paradigmas.

---

<sup>5</sup>Modellbasierte und datengetriebene, KI-basierte Ansätze der Verhaltensmodellierung aus dem Stand der Forschung werden in Abschnitt 2.6 präsentiert.



Abbildung 4.16 veranschaulicht die Abbildung von Verkehrsteilnehmerverhalten auf das Milgram-Kontinuum. Dessen linksseitige Intervallgrenze stellt reine modellbasierte, virtuelle Abbildungen des Verhaltens verletzlicher Verkehrsteilnehmer dar. Die rechtsseitige Intervallgrenze stellt dabei reale Verkehrsteilnehmer in der Feld- und Flottenerprobung dar, mit denen die Gefahr einer Kollision bei einer Fehlfunktion des Systems besteht. Zur Erstellung von Instanzen aus diesem Kontinuum sind zwei Erkenntnisse wichtig, auf denen folgend aufgebaut wird: Einerseits lassen sich Verkehrsteilnehmer als Verbund verschiedener, sequentieller Teilmodelle, wie der Perzeption, der Situationsanalyse, der Entscheidungsfindung und Ausführung dieser modellieren. Andererseits lassen sich Teilmodelle durch datengetriebene, funktionale Komponenten ersetzen, die seitens Referenzmesssysteme mit der realen Welt gekoppelt werden.

Während modellbasierte Methoden virtuelle Ausgangsgrößen bereitstellen, speisen datengetriebene Methoden aufgezeichnete, veredelte oder annotierte Messdaten zur Testzeit in das System ein. In [Zofka et al., 2015] wurde ein datengetriebener Replay-Mechanismus zur Szenarienerstellung vorgestellt. Dieser nutzt aufgezeichnete Sensordaten, um aus der Realfahrerprobung die Straßenführung und aufbauend die Verhalten der Verkehrsteilnehmer über Manöver zu klassifizieren. Diese mit Manöverbeschreibungen annotierten Trajektorien können dann ebenfalls durch Rekombination augmentiert und damit variiert werden. Solche Ansätze zeichnen sich jedoch durch eine offene Regelschleife aus und unterliegen dabei der fehlenden Reaktion der abgebildeten Verkehrsteilnehmenden.

In [Zofka et al., 2018b] wurde daher ein datengetriebener Ansatz zur Manipulation der Szenen durch Referenzmesssysteme und der damit ermöglichten Einbindung von Verkehrsteilnehmerverhalten in den Simulations- und damit Testprozess vorgestellt. In der Rolle eines Testoperators ist dieser in der Lage, den Testverlauf maßgeblich zu beeinflussen, indem er über ein Avatarmodell den Testverlauf im digitalen Zwilling beobachtet und über sein Verhalten maßgeblich die hochautomatisierte Fahrfunktion herausfordert. Hierfür sind zwei wesentliche Schnittstellen notwendig: Zum einen muss der Testoperator den Zustand des Testverlaufs im digitalen Zwilling wahrnehmen und zum anderen mit den darin enthaltenen Elementen interagieren können. Durch diese datengetriebene und immersive Integration und Kopplung mit der Simulation erfolgt eine direkte Feedbackschleife zwischen dem digitalen Zwilling und dem immersiven Operator. Die genannten Nachteile können damit behoben werden.

Dabei werden Referenzmesssysteme und Residualmodelle zur Abbildung des Verkehrsteilnehmerverhaltens als Bestandteil des Testsystems verwendet. Durch die Nutzung von Referenzmesssystemen unterliegt dieser Ansatz weder einem domänenspezifischen Drift noch potentiellen Grenzen der Ausdrucksfähigkeit der verwendeten Modelle, und ist auch nicht festgelegt auf die Verfügbarkeit von Aufzeichnungen oder deren starre Zeit-Raum-Abbildung und damit fehlende Feedbackmöglichkeit. Darstellung 4.16 zeigt beispielhafte Instanzen aus einem breiten Spektrum von Darstellungs-, wie auch Eingriffsmöglichkeiten zur Abbildung menschlichen Verhaltens auf.

## 4 Entwicklung virtuell erweiterter Testfelder und Prüfgelände



Abbildung 4.16: Verschiedene Instanzen der Immersion (von links nach rechts):  
 1. Monitorbasierte Darstellung von Punktwolken und controllerbasierter Steuerung. 2. Stereobasierte 3D-Darstellung mittels VR-Brille und tastaturbasierter Steuerung. 3. Monitorbasierte Darstellung abstrahierter 3D-Umgebung und Erfassung von Gelenkwinkeln. 4. Stereobasierte Darstellung einer 3D-Umgebung über VR-Brille und eine IMU-basierte Kopfposenerfassung.

Die Art und Weise der Augmentierung von Verkehrsteilnehmenden durch Immersion soll für ein Verhaltensmodell  $\mathbb{V}$  beschreibbar und quantifizierbar gemacht werden. Dies gilt insbesondere für die Immersion als Fußgänger. Hierzu lassen sich ein wahrnehmungs- und ein eingriffsbezogener Augmentierungsgrad  $\gamma$  und  $\tau$  definieren. Beide Augmentierungsgrade  $\gamma$  und  $\tau$  sind so gestaltet, dass je abstrakter die Anzeigevisualisierung ist, desto modelllastiger die notwendige Verarbeitung und damit geringer der Augmentierungsgrade. Selbiges gilt für  $\gamma$ : Je abstrakter und modellaster Eingriff und Steuerung der Verkehrsteilnehmer im digitalen Zwilling sind, desto geringer ist der Augmentierungs  $\tau$ . Beide Maße werden dabei auf Basis einer Dekomposition, vergleichbar mit einem Agentenmodell, definiert, siehe auch Abbildung 4.17a. Diese Aufteilung muss prüflings- und damit anforderungsabhängig a priori festgelegt werden.

Der wahrnehmungsbezogene Augmentierungsgrad  $\gamma$  mit  $\gamma: \mathbb{V} \mapsto [0, 1]$  bezieht sich dabei auf die Datenrepräsentation mit der ein Mensch über ein entsprechendes Sensor-, beziehungsweise Darstellungsmodell, in den Testversuch integriert wird. Es vernachlässigt dabei die verwendete Darstellungstechnologien (Monitor, ...). Der wahrnehmungsbezogene Augmentierungsgrad ergibt sich aus dem Verhältnis von  $a$  verarbeitenden zu insgesamt  $b$  vorhandenen Perzeptionskomponenten, die aus der benannten Dekomposition resultieren:

$$\gamma(v) = \frac{a}{b} \quad . \quad (4.19)$$

So lassen sich die in Abbildung 4.16 dargestellten Instanzen einer (monitorbasierten) Punktwolkendarstellung  $i$  oder mittels Landmarken abstrahierten 3D-Umgebung  $j$ , und Stereokamera- und damit ermöglichten VR-basierten Darstellung einer 3D-Umgebung  $k$  wie folgt einordnen:

$$0 \leq \gamma(i) < \gamma(j) < \gamma(k) \leq 1 \quad (4.20)$$

Der eingriffsbezogene Augmentierungsgrad  $\tau$  mit  $\tau: \mathbb{V} \mapsto [0, 1]$  beschreibt und ordnet ein, inwieweit Beobachtungen von Referenzmesssystemen auf Objekte und Eigenschaften des Umweltmodells aufgeprägt werden. Der Augmentierungsgrad  $\tau$  setzt dabei die Anzahl der übergangenen Modelle  $c$  zu der Menge sämtlicher Modelle  $d$  ins Verhältnis:

$$\tau(v) = \frac{c}{d} \quad (4.21)$$

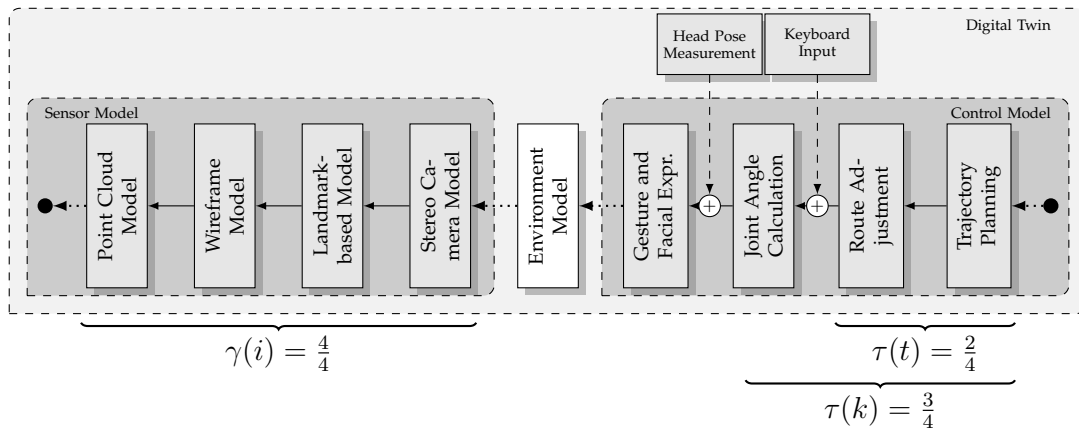
So lassen sich die in Abbildung 4.16 gezeigten Anzeigemodalitäten eines controllerbasierten Eingriffs  $c$ , tastaturbasierten Eingriffs  $t$ , der Erfassung der Kopfpose und daraus abgeleiteten Körperpose  $k$  oder der der Gelenkwinkel eines immersiven Probanden  $g$  wie folgt einordnen:

$$0 \leq \tau(t) < \tau(c) < \tau(k) < \tau(g) \leq 1 \quad (4.22)$$

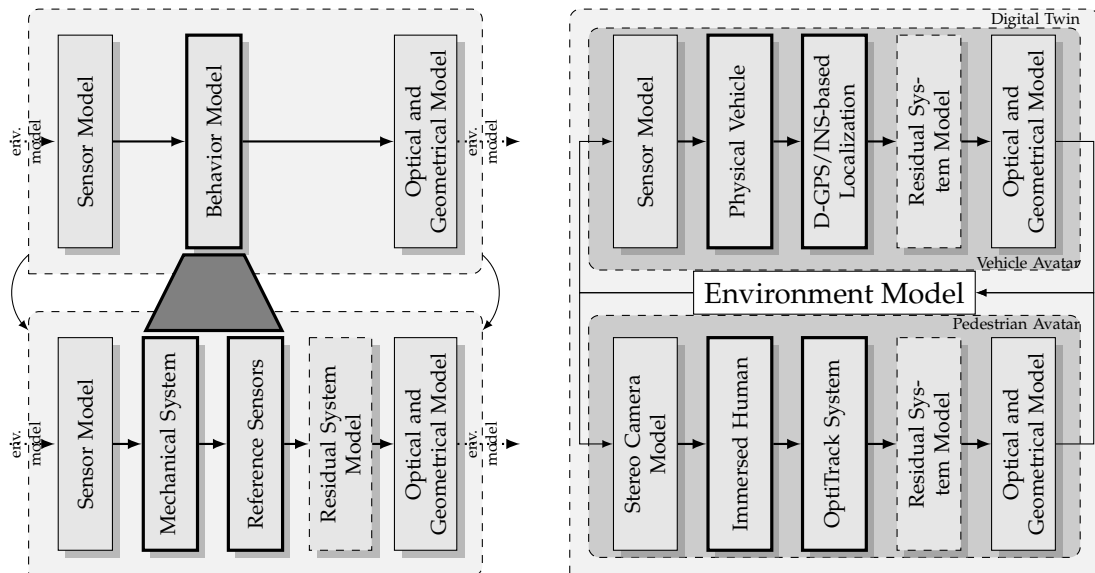
Über die in Abbildung 4.17a exemplarisch angenommene Dekomposition kann eine Einordnung einer Messung der Kopfpose  $\tau(k) = \frac{3}{4}$ , beispielsweise über eine internes oder externes Tracking einer VR-Brille, gegenüber dem tastaturbasierten Eingriff mit  $\tau(t) = \frac{2}{4}$  quantifiziert werden.

Die Ersetzung eines agentenbasierten Verhaltensmodells durch die Beobachtung eines realen Probanden als Fußgänger oder Passagier, kann über das in [Zofka et al., 2018b] veröffentlichte Avatarmodell, siehe Abbildung 4.17b, nachvollzogen werden. Der reale Proband wird als Fußgänger oder Passagier in den Versuch über eine Darstellung des Umweltmodells integriert, agiert entsprechend seiner Kognition, wie dem Aufgabenverständnis, und seine Reaktion wird über ein Referenzmesssystem bemessen und in den digitalen Zwilling eingespeist.

Das **Sensormodell** diskretisiert, tastet das Umweltmodell ab und filtert dieses, um es für eine entsprechende Darstellung an den Proband aufzubereiten. Diese wird dem Testoperator dargestellt und versetzt ihn in die Lage, die aktuelle Verkehrssituation zu bewerten und sich darin zu bewegen. Hierbei kann es sich um eine möglichst realitätsgetreue Darstellung, wie eine 3D-Umgebungsdarstellung mittels Stereokameramodell und VR-Brillen basierte Darstellung oder auch um eine Gitternetzdarstellung über einen Monitor handeln. Der Mensch interagiert in seiner sicheren Umgebung über seine Wahrnehmung, Kognition und dem **mechatronischen System** mit dem digitalen Zwilling und dem darin stattfindenden Testversuch. Das resultierende Verhalten des Menschen, wie Positionsänderung, Gelenkwinkel, Kopfpose oder auch Gestik und Mimik, wird über ein **Referenzmesssystem** erfasst und auf den im Umgebungsmodell befindlichen Avatar abgebildet. VR-Systeme übernehmen zumeist die Darstellung der Visualisierung als auch die Messung und das Tracking der Kopfposen [270].



- (a) Beispielhafte Dekomposition, anhand dessen die Augmentierungsgrade der Wahrnehmung  $\gamma$  und der Beeinflussung  $\tau$  bemessen werden können. Die Abbildung der beispielhaften Tastatureingaben oder Kopfposenmessung erfolgt mittels Modellen, die diese Messungen auf Eigenschaften eines Avatars, wie eine Positionsänderung, innerhalb des Umgebungsmodells abbilden.



- (b) Ersetzung eines Verhaltensmodells über ein Referenzmesssystem, anlehnend an [Zofka et al., 2018b]. (c) Analogie der Einbettung des Fußgängers zu Vehicle-in-the-loop, anlehnend an [Zofka et al., 2018b].

Abbildung 4.17: Das Avatarmodell beschreibt mögliche Zugriffspunkte für die Übernahme von Messgrößen aus von den realen Menschen betrachtenden Referenzmesssystemen. Durch eine Gleichstellung der verschiedenen Modelle ergibt sich eine Analogie zum Testen von Fahrzeugen mittels VIL-Prinzips.

Das **optisch-geometrische Modell** dient als virtuelles Gegenstück des Fußgängers im digitalen Zwilling und bildet dessen dynamische, geometrische und sensor-spezifische Eigenschaften ab.

Sind Eigenschaften durch das Referenzmesssystem nicht direkt beobachtbar, oder Schnittstellen zur Ansteuerung des Avatarmodell im Umgebungsmodell des digitalen Zwillings nicht durch die Messgrößen des Referenzmesssystem ansprechbar, müssen zusätzliche Modelle zur Konvertierung oder Abbildung verwendet werden. Dieses Vorgehen ähnelt dem Vorgehen bei beispielsweise HIL-Prüfständen, bei denen noch nicht real zur Verfügung stehende Steuergeräte durch Restbussimulationen ersetzt werden, siehe Abbildung 4.17c. So werden Komponenten des Teilnehmers, die im Testversuch nicht über ein Referenzmesssystem erfasst werden, modellbasiert abgebildet und können dadurch nachgestellt, beziehungsweise simuliert werden. So können auch beobachteten Bewegungsänderungen Gelenkwinkeländerungen oder aus einer alleinig beobachteten Kopfpose eine Körperposenänderung regelbasiert abgeleitet werden.

#### 4.3.2 Bildung und Integration datengetriebener Ansätze

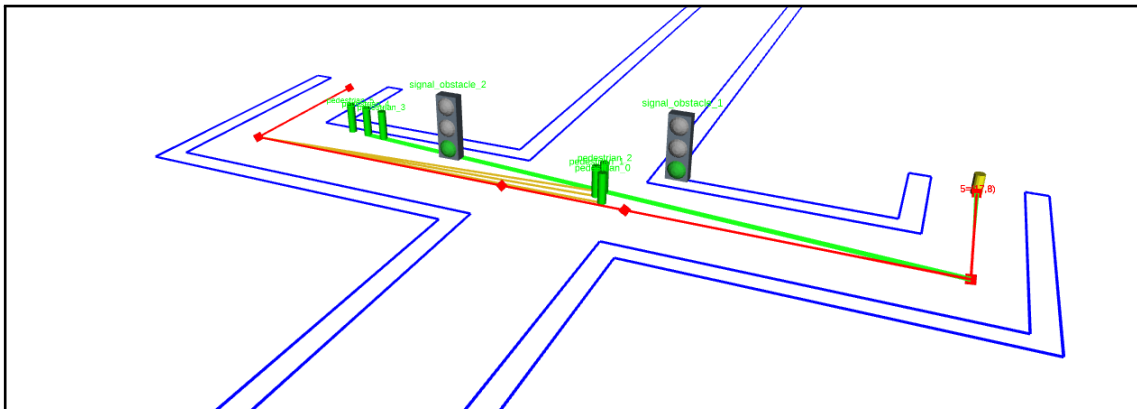
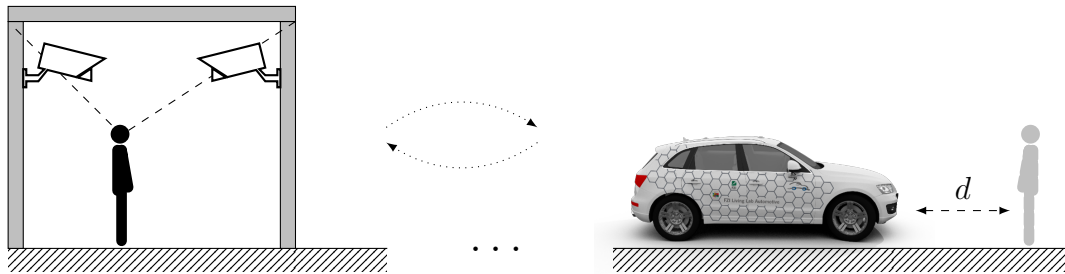


Abbildung 4.18: Die Szene zeigt die logische Szenenstruktur eines signalisierten Fußgängerüberwegs auf. Eine Fußgängergruppe (grüne Zylinder) kreuzt dabei den Fußgängerüberweg mit individuellen Trajektorien (gelb) entlang der Route (rot).

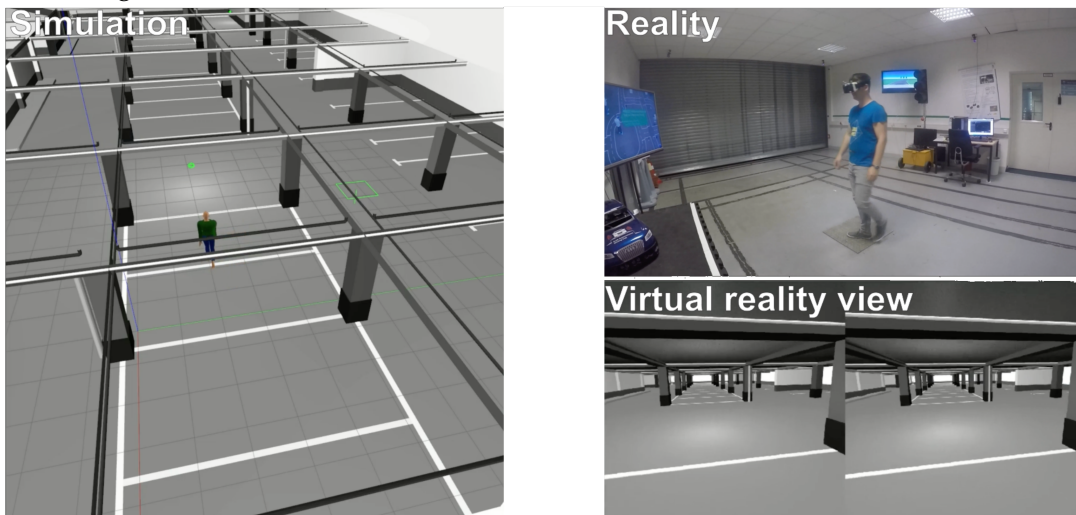
In [Zofka et al., 2020] wurde eine aus der Domäne von Evakuierungsszenarien [194] motivierte Verhaltensbeschreibung mit dem Wissen um Straßen, Fußgängerwegen und Fahrzeugen als weitere Verkehrsteilnehmer ergänzt, Verkehrsszenarien abgebildet werden können, siehe Abbildung 4.18. Diesem Ansatz der modellbasierten Bildung und Integration von Verhaltensmodellen stehen die datengetriebenen Ansätze gegenüber. Diese erlauben das Verhalten von Verkehrsteilnehmern mittels asynchronem Replay von aufgezeichneten, beziehungsweise zu Objektlisten abstrahierten Sensordaten, siehe auch [Zofka et al., 2015], oder Online-Messung über Referenzmesssysteme in das Testsystem zu integrieren. Auf Basis der Einordnung in das Milgram-Kontinuum, siehe auch Abbildung 4.16, wird folgend aufgezeigt, wie sich ein Mensch als Fußgänger oder Passant mittels Online-Messung über Referenzmesssysteme in den Testdurchgang integrieren lässt.

### Der immersive Testteilnehmer in der Rolle des Passanten

Um gefahrenlos kritische Szenarien und Interaktionen evaluieren zu können, werden diese Interaktionen über Referenzmesssysteme in den digitalen Zwilling des Prüfgeländes oder Testfeldes verlagert. Eine entsprechende Vorgabe des Verhaltens oder der gegenüber der automatisierten Fahrfunktion abzubildenden Manöver muss dem Teilnehmer vorgegeben werden. Dieses Vorgehen entspricht dem XIL-Vorgehen bei der Entwicklung von Fahrzeugsystemen, bei dem das Verhalten der Fahrzeuge, wie Lenkwinkel und Raddrehzahlen, auf einem Rollenprüfstand in eine virtuelle Simulationsumgebung gespiegelt werden. Sowohl das reale Fahrzeug als auch der Fußgänger in einer VR Umgebung werden hierzu in einem gemeinsamen Umgebungsmodell, dem augmentierten Szenariemodell  $\mathbb{U}$ , verortet. Abb. 4.19 skizziert die Integration eines immersiven Verkehrsteilnehmers in der Rolle eines Passanten in das Umgebungsmodell des Fahrzeugs.



(a) Konzept der datengetriebenen Integration eines immersiven Fußgängers durch Bewertung des Verhaltens.



(b) Initialer Aufbau der initialen VR-Umgebung für die Immersion eines Fußgängers mittels externer Lokalisierung und Smartphone-basierter VR-Brille.

Abbildung 4.19: Immersive Umgebung zur Integration in das Umweltmodell eines HAD mittels OptiTrack Systems, bestehend aus sechs Flex13 Kameras, die einen ellipsoidalen Arbeitsraum von ca. 4 m x 2 m erlauben.

Die Integration des immersiven Teilnehmers erfolgt über das eingangs vorgestellte Avatarmodell. Das für diese Darstellung mittels Virtual Reality Brille darzustellende Stereobild notwendige Sensormodellierung agiert dabei auf der Modellrepräsentation des Avatarmodells im Szenengraphen  $S$  des augmentierten Szenariomodells  $U$ . Das an diesem verortete Sensormodell erfasst und abstrahiert die virtuelle Umgebung, wie beispielsweise mittels Physical-based Rendering, Raytracing- oder Shader-basierender Pipeline zur Erstellung der virtuellen Kamerabilder. Dabei ist diese Anwendung keineswegs auf photorealistische Darstellungen begrenzt, sondern kann - abhängig von den Anforderungen an das Testsystem - auch andere Visualisierungen zur Analyse, wie die Bewegungsanalyse mittels Space Time Cube, vergleiche Abbildung 4.15, in VR bieten.

Der Rückfluss des beobachteten Verhaltens erfolgt dann wiederum über die Aufprägung dieses Verhaltens auf das Avatarmodell im Szenengraphen  $S$ . Die Ansteuerung und Abbildung des realen Verhaltens am Avatar erfolgt entweder mittels Inertial-, oder externen kamera- oder laserbasierten Inside-Out-Positionsverfolgungssystems des Kopfes und nachfolgend modellbasierter Ableitung einer möglichen zugehörigen Körperbewegung beschreibendes Modells. Der Aufbau der zu testenden, automatisierten Fahrfunktionen gibt dabei den Grad der abzubildenden Verhaltensaspekte, wie Bewegung, Gestik oder Mimik an. Für einen Test eines Kollisionsschutzes kann dabei aus der Beobachtung der Kopfbewegung ein Gesamtkörperbewegungspfad oder auch aus der Geschwindigkeit und Drehrate des gemessenen Verhaltens eine Gelenkwinkelanimation abgeleitet werden.

Das Prinzip der Referenzierung der Bewegungen des Fahrzeugs und des Fußgängers erfolgt dabei wie folgt: Die Inertialsensorik der Virtual-Reality Brille oder der externen Sensorik der VR-Umgebung erlaubt die Messung der Kopfpose  $\mathbf{x}_h$  relativ zu einem künstlichen Referenzpunkt im VR-Bereich mit  $\mathbf{x}_h = (x, y, z, \phi, \psi, \omega)^T$ . Trifft man nun beispielsweise eine starre Körperannahme als Residualmodell mit der Körperhöhe  $\hat{z}$ , so lässt sich auf die Gesamtkörperposition und -orientierung mittels folgender einfacher Transformation  ${}^{\text{body}}\mathbf{T}_{\text{head}}$  schließen:

$${}^{\text{body}}\mathbf{T}_{\text{head}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \mathbf{0} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} \\ \\ -\hat{z} \\ \end{matrix} \quad (4.23)$$

Die Pose des Passanten im testfeld-, bzw. prüfgelände-bezogenen Koordinatensystem  $\mathbf{x}_{\text{world}}$  ergibt sich dann mittels einer zu kalibrierenden, statischen Transformation zwischen der Laborumgebung und dem Prüfgelände  ${}^{\text{world}}\mathbf{T}_{\text{Lab}}$ :

$$\mathbf{x}_{\text{world}} = {}^{\text{world}}\mathbf{T}_{\text{Lab}} * {}^{\text{body}}\mathbf{T}_{\text{head}} * \mathbf{x}_{\text{head}} \quad (4.24)$$

Lässt sich nun die dreidimensionale Pose des Fahrzeugs über eine metrische Koordinatentransformation  $\mathbf{T}$  zu einem künstlichen Nullpunkt des Prüfgeländes oder Testfeldes beziehen, so ergibt sich das Verhalten beider Teilnehmer zueinander in einem selben Koordinatensystem und der Abstand  $d$  ergibt sich zu

$$d = \|\mathbf{x}_{\text{veh,world}} - \mathbf{x}_{\text{ped,world}}\| \quad (4.25)$$

### Der immersive Testteilnehmer in der Rolle des Mitfahrenden

Dieses Konzept kann ebenfalls auf einen potentiellen Mitfahrenden adaptiert werden, um innerhalb des Versuchs auf das Testgeschehnis Einfluss zu nehmen. Dies kann über verschiedene Rollen erfolgen: Als **Testingenieur** besteht die Aufgabe in der Bewertung und Beurteilung einer Testfahrt mittels eigener Einschätzung und Erfahrung der durch das Fahrzeug, insbesondere die Hochautomatisierung, verursachten Dynamik, Komfortfunktionen oder auch Sicherheitsmanöver des Fahrzeugs. Dazu gehören beispielsweise Brems-, Beschleunigungs- oder Ausweichmanöver. Als in der Rolle des mitfahrenden Passagiers **beteiligter Verkehrsteilnehmer**, können Interaktionen mit der Hochautomatisierung oder insbesondere Fahrerassistenz getestet werden. Durch die Integration wird ein gefahrenloses Testen von Wechselwirkungen, wie Übergabefunktionen der Automatisierungsstufen 3-4 nach SAE, testbar. Weitere Rollen, wie die des Sicherheitsfahrers oder Leitstandoperators, werden in der aufbauenden Forschungsarbeit [Gremmelmaier et al., 2022] beleuchtet.

Hierzu wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit in [Zofka et al., 2014a] ein Konzept für eine Posenschätzung durch ein robustes Erkennen und Verfolgen des Fahrerkopfes und Referenzmesssystems trotz fahrdynamischer Einflüsse entwickelt. Typische inertielle Messsysteme können aufgrund der Eigenbewegung des Fahrzeugs und daraus resultierenden, hohen Beschleunigungs- und Rotationssimulationen nicht verwendet werden. Daher wurde ein kamerabasiertes, bildbasiertes Verfahren zum Verfolgen der Kopfpose eines Fahrers im Innenraum eines Fahrzeugs entwickelt. Das Verfahren fußt auf einer relativen Lokalisierung des Fahrerkopfs durch am Fahrzeughimmel angebrachte Referenzmarkerfläche, die mittels einer an der Augmented-Reality Brille angebrachten Kamera verfolgt wird, siehe folgende Abbildung 4.20.

Die relative Bestimmung der Kamerapose zum am Fahrzeug fixierten Fahrzeughimmel liefert eine Koordinatentransformation  ${}^{\text{head}}\mathbf{T}_{\text{marker}}$ , die das Markersystem relativ zum an der Augmented Reality Brille angebrachten Kamerasystem beschreibt. Da die Pose des Markerarrays  ${}^{\text{veh}}\mathbf{T}_{\text{marker}}$  fix zum Fahrzeug eingemessen und kalibriert werden kann, ergibt sich die Pose des Fahrerkopfs, siehe Abbildung 4.20c, durch

$${}^{\text{veh}}\mathbf{T}_{\text{head}} = {}^{\text{veh}}\mathbf{T}_{\text{marker}} * {}^{\text{head}}\mathbf{T}_{\text{marker}}^{-1} \quad . \quad (4.26)$$

Schließlich ergibt eine weitere Transformation, mit der durch einer Lokalisierung festgestellten metrischen Pose - relativ zum testfeld-, beziehungsweise prüfgelände-bezogenen Basiskoordinatensystems - die um Umfeldmodell des Fahrzeugs bezogene Fahrerpose  $\mathbf{x}_{\text{head}}$ , die auf den Avatar aufgeprägt wird und wiederum als Aufhängungspunkt für das Stereokameramodell dient. Abbildung 4.20d zeigt ein im IPG CarMaker implementiertes Stereokameramodell [Zofka et al., 2014a].



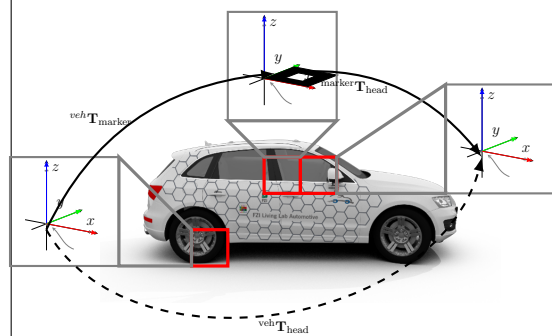
### 4.3 Abbildung von Verkehrsteilnehmern auf virtuell erweiterte Testfelder



(a) Referenzmarkerfläche am Fahrzeughimmel.



(b) Um Kamerasystem ergänzte Augmented Reality-Brille.



(c) Koordinatensystemtransformationen zur Abbildung einer Kopfpose relativ zum Fahrzeug.



(d) Umgesetztes Stereomodell in IPG CarMaker Movie.

Abbildung 4.20: Kamerabasierte Methode zur robusten Erfassung der Fahrer-kopfpose trotz fahrdynamischer Einflüsse. Bildquellen (a), (c) und (d) aus Veröffentlichung [Zofka et al., 2014a], mit freundlicher Genehmigung von Springer Nature.

## 4.4 Analyse, Modellierung und Injektion von Umweltmodellen

Die bisher vorgestellten Methoden erlauben die Generierung eines Verkehrsszenarios, welches aus realen und virtuellen Situationsaspekten konsistent zusammengesetzt wurde. Die letztendliche Zusammenführung und damit Instantiierung findet allerdings durch Zuführung der virtuell überlagerten Sensordaten an eine erweiterte Fahrerassistenzfunktion oder hochautomatisierte Fahrfunktion statt. Erst durch diese Zuführung findet eine explizite Zusammensetzung der Elemente der Szenerie und der dynamischen Objekte statt. Das dabei zusammengesetzte, damit aus realen und virtuellen Elementen bestehende Szenario, stimuliert letztendlich die zu testende Funktion. Damit kann eine Funktion auf Basis von teilbekannten und teilkontrollierbaren Umwelt bewertet werden.

Der Abschnitt führt daher in die Analyse, Modellierung und Injektion der virtuellen Umweltmodelle in die Fahrfunktion ein. Diese werden konzeptuell im Injektionsschnittstellencontainer II gehalten. Dazu werden in Abschnitt 4.4.1 auf Basis der in Kapitel 3.2.4 definierten Referenzarchitektur hochautomatisierter Fahrfunktionen geeignete Schnittstellen zur Injektion identifiziert. Diese Schnittstellen bedingen unterschiedliche Modellierungen von Sensor- und Umweltmodellen in den zugrunde liegenden Simulationen, siehe Abschnitt 4.4.2. Diese Schnittstellen nehmen entsprechend die virtuellen Sensordaten der virtuell erweiterten Umgebungsmodelle entgegen und augmentieren diese auf Basis von Signalen der Sensormessräume. Darauf aufbauend zeigt Abschnitt 4.4.3 Methoden zur Augmentierung und deren Fusion entlang der verschiedenen Schnittstellen auf.

Schließlich wird im Abschnitt 4.5 auf die Umsetzung mittels einer verteilten Simulationsarchitektur fokussiert, die eine Trennung zwischen globaler Umweltsimulation und Sensorsimulation zur Einbettung mehrerer Prüflinge erlaubt.

### 4.4.1 Analyse von Injektionsebenen der HAD-Funktion

Zum Testen verschiedener Bestandteile einer hochautomatisierten Fahrfunktion werden dieser augmentierte Verkehrsszenarien zugeführt. Bei einer komponenten- und schichtenweise-strukturierten Systemarchitektur eignen sich hierfür Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten als Zugangspunkt. Diese Zuführung findet dabei ähnlich zu Verfahren der Fehlerinjektion statt, hier werden Fehlerursachen und -zustände in ein Zielsystem eingespeist, um ein System auf seine Verlässlichkeit unter Vorherrschen fehlerhafter Umstände bewerten zu können. Insbesondere die Suche nach einem einzelnen Ausfallpunkt (engl.: „*single points of failure*“), also das Bestimmen von Komponenten, deren Versagen zu einem Ausfall des Gesamtsystems führen, motiviert diesen Ansatz. So formuliert [271, S. 2], dass „die Grenze zwischen Testen und Fehlerinjektion [...] oft fließend [sei]“. Anstelle von Fehlern werden nun Verkehrsszenarien, wie Grenzfälle menschlichen Verhaltens oder Herausforderungen urbaner Szenarien, zugeführt.

Der Eingriff auf die Verarbeitungskette zwischen sensorieller Wahrnehmung und dem Umweltmodell einer Fahrfunktion kann also auf das Milgram-Kontinuum abgebildet werden, siehe folgende Abbildung 4.21.

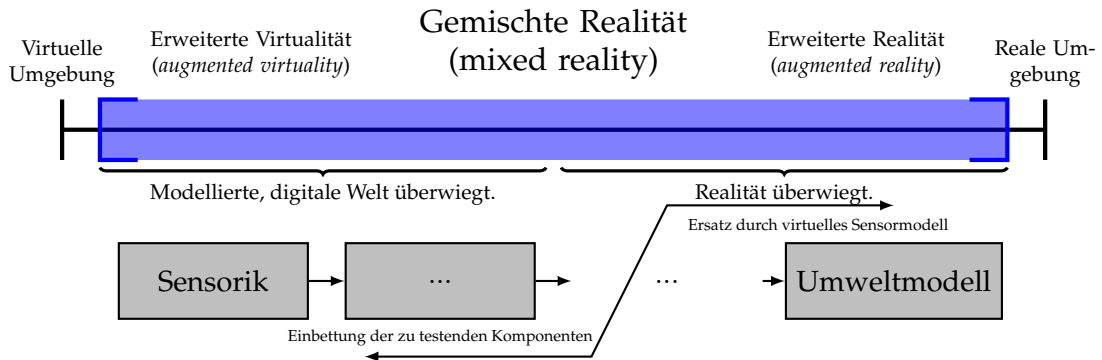


Abbildung 4.21: Abwägung zwischen der Verwendung von virtuellen Sensormodellen und Funktionen der zu testenden Fahrfunktion entlang des Milgram-Kontinuums.

Zieht man nun die exemplarische Referenzarchitektur aus Abschnitt 3.2.4 heran, ergibt sich eine sequentielle Verarbeitung der Sensordaten, über die Umgebungswahrnehmung bis hin zum aggregierenden Umweltmodell, auf dem die hochautomatisierte Fahrfunktion die zu folgende Aktion plant. Werden die Fahrzeugsensoren über eine sensornahe Injektion stimuliert, so wird im Wesentlichen die gesamte Verarbeitungskette der automatisierten Fahrfunktion zum Aufbau des Umweltmodells stimuliert und getestet. Dies entspricht einer Instanz entlang der erweiterten Virtualität.

Werden jedoch aus einer Simulation Objekte direkt dem Umweltmodell über eine entsprechende Injektionsschnittstelle zugeführt, so wird ein wesentlicher Bestandteil der eingangs erwähnten Verarbeitungskette beim Test „ausgespart“. In diesem Fall wird unterstützend ein, eine äquivalente Modellrepräsentation lieferndes Sensor-, beziehungsweise Umweltmodell als Ersatz für die ausbleibenden Komponenten aus dem digitalen Zwilling heraus benötigt. Damit geht einher, dass entsprechende Annahmen in diesen „Umweltsensor“ miteinfließen und entsprechend weniger Komponenten zum Aufbau des Modells getestet werden können. Dies entspricht einer Instanz entlang der erweiterten Realität.

Auf Basis dieser Überlegungen kann somit ein Augmentierungsgrad  $\eta$  für eine Injektionsmodell  $\mathbb{I}$  definiert werden, der einen Grad zwischen der virtuellen und realen Integration der Fahrfunktion innerhalb einer konkreten Testsystemkonfiguration  $\mathbb{S}_i$  angibt. Der Augmentierungsgrad  $\eta$  wird bei einer komponenten- und schichtenweisen Architektur mit  $\eta: \mathbb{I} \mapsto [0, 1]$  als Injektionspunkt nach dem  $r$ -ten Verarbeitungsglied von insgesamt  $s$  Schichten definiert:

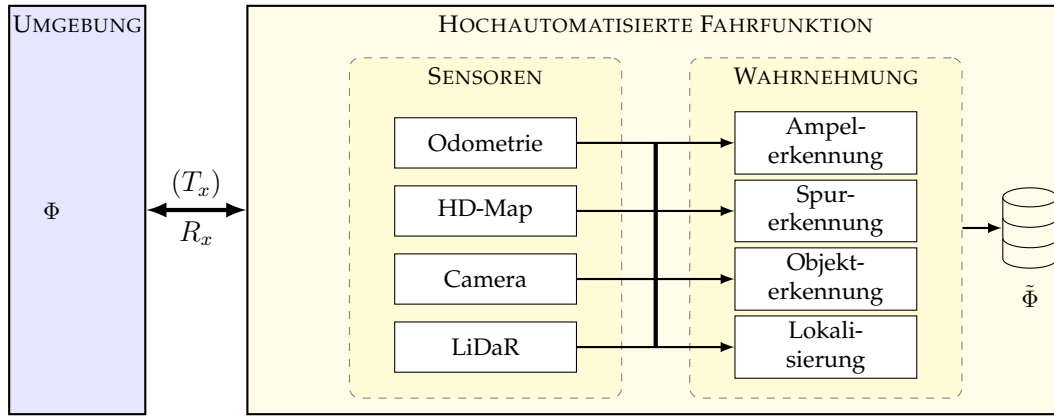
$$\eta(i) = \frac{r}{s} \quad . \quad (4.27)$$

Eine Instantiierung wird damit durch den Augmentierungsgrad, also dem Anteil der Funktionen, die in ihrer Gesamtheit durch ein entsprechendes virtuelles Sensormodell ersetzt werden, charakterisiert. Somit ergibt sich für eine sensornahe Injektion ein Augmentierungsgrad von  $\eta \approx 0$ , wohingegen eine Injektion nahe Umweltmodell  $\eta \approx 1$  ergibt. Der Augmentierungsgrad ist somit abhängig von einer konkreten Systemarchitektur.

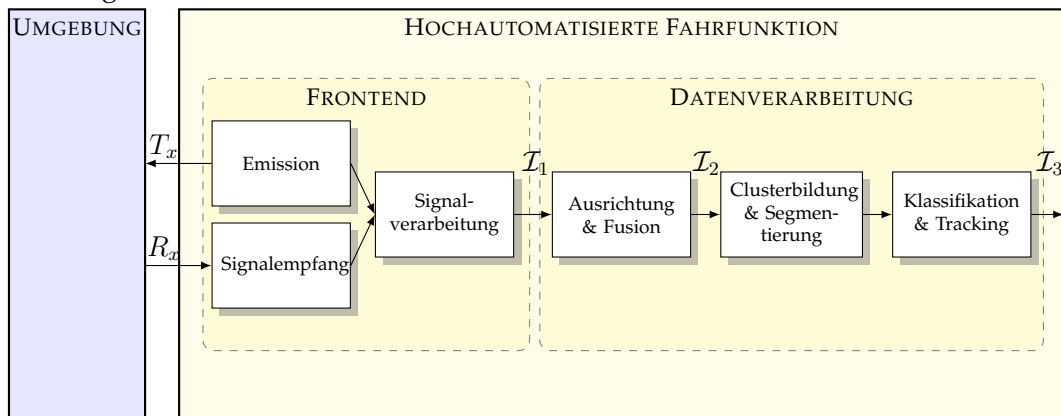
Die Analyse einer konkreten hochautomatisierten Fahrfunktion ermöglicht die Identifikation beispielhafter Injektionspunkte  $\mathcal{I} = \{\mathcal{I}_1, \dots, \mathcal{I}_n\}$ , die für die Zuführung der digital erweiterten Verkehrsumwelt an die hochautomatisierte Fahrfunktion verantwortlich sein können. So erzeugt eine hochautomatisierte Fahrfunktion, siehe Abbildung 4.22a, mittels Sensorik und algorithmischer Datenverarbeitungskette aus einer ihr exponierten Verkehrsumgebung  $\Phi = \{\phi_1, \dots, \phi_n\}$  ein entsprechendes - da abgetastet und quantifiziert - reduziertes Umweltmodell  $\tilde{\Phi} = \{\tilde{\phi}_1, \dots, \tilde{\phi}_m\}$ . Exterozeptive, aktive Sensoren interpretieren mittels eines emittierten physikalischen Signals  $T_x$  und dessen reflektierter Signalsignatur  $R_x$  die direkten geometrischen und strukturellen Gegebenheiten der Verkehrsumgebung, oder auch passiven Sensoren, wie Kameras durch Nutzung des im sichtbaren Spektrums erfassten Lichts. Das systemimmanente Umweltmodell  $\tilde{\Phi}$  stellt dabei die relevanten, für die Erfüllung der Fahraufgabe notwendigen, Situationsaspekte, wie Verkehrsobjekte, -hindernisse und -regeln, aber auch Fahrspuren dar. Auf dieser Basis wird dann eine Situationsbestimmung und Verhaltensplanung des Fahrzeugs für einen zeitlich-räumlichen Horizont angestoßen.

Diese exterozeptiven Sensorsysteme können dabei bereits mit einer entsprechenden Datenverarbeitung zur Ableitung von Objekt- oder Hindernislisten integriert und als gesamtheitliches und integriertes Sensorsystem gehandhabt werden. In der vorliegenden Arbeit wurde daher eine funktionale Dekomposition zur Identifikation von Schnittstellen einer beispielhaften Lidar-basierten Objekterkennung in [Rosenberger et al., 2019a, Rosenberger et al., 2019b] durchgeführt, siehe Abbildung 4.22b. Das integrierte Sensorsystem lässt sich in ein sogenanntes Frontend und eine Datenverarbeitungseinheit separieren. Das Frontend emittiert Laserimpulse in die präsente Verkehrsumgebung, erfasst und bemisst die zurückgelieferten Echos. Daran anschließend verarbeitet die Datenverarbeitungspipeline die empfangenen Impulse bis hin zu Objektlisten.

An diesem integrierten Sensorsystem lassen sich die folgenden Schnittstellen  $\mathcal{I}_1, \mathcal{I}_2$  und  $\mathcal{I}_3$  identifizieren: Die Daten am Ausgang des Frontends an der Schnittstelle  $\mathcal{I}_1$  werden generell als Rohscans bezeichnet, die die aus der Umgebung reflektierten Signale als Distanzwerte und Echos in radialen Koordinaten listenförmig kodieren. Die funktionale Verarbeitung durch Anordnung, Kalibrierung und Fusion (engl.: „*alignment, calibration and fusion*“) rekonstruiert daraus eine Punkterepräsentation in einem kartesischen Koordinatensystem, den Punktwolken (engl.: „*pointclouds*“). Im Falle eines integrierten Multisensorsystems findet eine Fusionierung der verschiedenen Rohscans durch eine örtliche und zeitliche Kalibrierung der verschiedenen Sensoreinheiten zueinander, sowie eine Fahrzeugreferenzierung durch eine externe Kalibrierung statt.



(a) Wahrnehmung einer vorliegenden Verkehrssituation  $\Phi$  und Fahrzeugzustand hin zum Umgebungsmodell  $\tilde{\Phi}$  als Basis der Situationsbestimmung, Planung und Ausführung.



(b) Funktionale Dekomposition für ein integriertes, auf Lidar basierendes Objektdetektionssystem. Darstellung entlehnt an [Rosenberger et al., 2019a].

Abbildung 4.22: Sensordatenverarbeitung mittels einzelner und integrierter Sensorsysteme zum Aufbau des expliziten Umweltmodells.

Schnittstelle  $\mathcal{I}_2$  liefert somit eine geordnete Gesamtpunktwolke. Insbesondere für die Detektion von Objekten schließt sich hier eine Ballungsanalyse (engl.: „*clustering*“), Segmentierung (engl.: „*segmentation*“) als auch Klassifikations- und Verfolgungsphase (engl.: „*classification and tracking*“) an. Segmentierte und somit zueinander gehörige Teilpunktwolken werden kontinuierlich mittels temporalen Verfolgungsmodellen, wie Kalmanfiltern, über die Zeit hinweg verfolgt. Diese Beobachtungen werden mit Bewegungs- und Verhaltensmodellen in die Schätzung weiterer Objekteigenschaften, wie Geschwindigkeit und Klasse des Objektes, gegeben. So werden die typischerweise als L-Shapes bekannten Muster genutzt, um über die Zeit hinweg Verkehrsteilnehmer zu erfassen, zu verfolgen und deren geometrische Abmaße kontinuierlich zu schätzen. Werden aber beispielsweise Objektlisten-generierende CNN verwendet, so degradiert die Schnittstelle  $\mathcal{I}_2$ . Die zeitliche Fusion erlaubt die Zuweisung eindeutiger Schlüssel, um Objekte über mehrere Zeitschritte hinweg zu identifizieren, zuzuordnen und als Objektliste an Schnittstelle  $\mathcal{I}_3$  anlegen zu können.

Am Beispiel des integrierten Lidar-Sensorsystems zeigt sich, dass die modulare Systemkette einer hochautomatisierten Fahrfunktion diverse Injektionsschnittstellen bietet, die sich für eine Zuführung des virtuellen Augmentierungsmodells eignen. Weitere befinden sich entlang der Wirkkette der hochautomatisierten Fahrfunktion bis hin zum Umweltmodell. Sowohl sensornahe Injektionsschnittstellen, wie Rohscans, als auch höherwertige Repräsentationen, wie Stixel-, Voxelansätze oder Objektlisten, oder auch hochgenaue Karten können verwendet werden. Für jede Injektionsstufe benötigt man ein virtuelles Vorverarbeitungsmodell, welches entsprechend der Annahmen realistische Daten bietet.

Zur Augmentierung entlang dieser Injektionsschnittstellen kann eine Augmentierungsfunktion  $\Pi(\mathbf{v}, \mathbf{r}, z)$  formuliert werden, die aufgabenspezifisch reale und virtuelle Signale  $\mathbf{r}$  und  $\mathbf{v}$  aus den jeweiligen Messräumen  $\mathcal{S}_r$  und  $\mathcal{S}_v$  der Sensoren, sowie einen zusätzlichen Steuereingang  $z \in \{0, 1, 2\}$  entgegennimmt. Es wird dazu angenommen, dass die Abbildung in die Messräume der Sensoren aufgabenspezifisch genug erfolgen kann und daher im Folgenden  $\mathcal{S}_r = \mathcal{S}_v$  gilt. Diese Funktion bestimmt inwieweit Sensormodellausgaben oder Umweltmodelle  $\mathcal{S}(\Phi_v)$  sowie die Ausgaben der realen Funktionen  $\mathcal{S}(\Phi_r)$  miteinander fusioniert und augmentiert und der hochautomatisierten Fahrfunktion zugeführt werden:

$$\Pi(\mathbf{v}, \mathbf{r}, z) = \begin{cases} \mathcal{S}(\Phi_r), & \text{wenn } z = 0 \\ \mathcal{S}(\Phi_v), & \text{wenn } z = 1 \\ \mathcal{S}(\Phi_r) \oplus \mathcal{S}(\Phi_v), & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.28)$$

Diese Injektionsschnittstellen können dabei für verschiedene Sensorsysteme und verarbeitende Funktionen softwareseitig über das Stellvertreter-Entwurfsmuster (engl.: „proxy“) umgesetzt werden. Sämtliche Proxy-Komponenten aller sensor- und verarbeitungsspezifischen Komponenten nehmen dabei eine Szenarien- und Konfigurationsbeschreibung entgegen und koordinieren die Zusammenstellung aus virtuellen und realen Objekten, siehe folgende Abbildung 4.23.

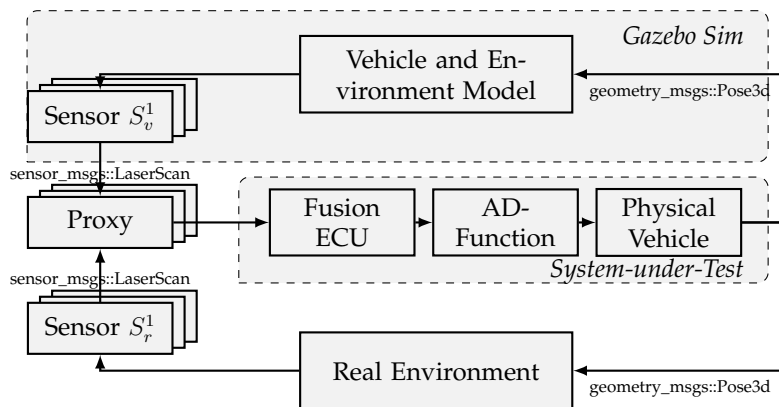


Abbildung 4.23: Prinzip einer Proxy-Komponente am Beispiel eines Multi-Lidar-Sensorsystems mittels ROS und Gazebo Sim. Darstellung leicht modifiziert aus [Zofka et al., 2018a], © 2018 IEEE.

### 4.4.2 Sensor-, Umwelt- und Fahrzeugmodellierung

Die betrachteten Injektionsschnittstellen definieren den Zugangspunkt, der mit geeigneten Injektionsmustern aus Sensor- oder Umweltmodellen augmentiert und stimuliert wird. Diese Modelle tasten dabei, diskretisieren und transformieren die virtuelle Umwelt  $\Phi_v$  in den Messraum des entsprechenden Sensors oder der Komponente. Die Transformation aus dem Grundwahrheitsmodell ist dabei entsprechend des Mess- und Abbildungsprinzips verlustbehaftet. Für die verschiedenen Messräume  $S$  können in Simulationsumgebungen Abbildungen geschaffen werden, die zusätzliche, für die Augmentierung benötigte Grundwahrheitswerte, beschreiben. So können jedem Pixel eines generierten Kamerabildes oder jedem Punkt einer Subpunktvolke das jeweilig der Abbildung in den Sensorraum  $S$  zugrunde liegende Verkehrsobjekt mit seiner eindeutigen Szenengraphnummer, seiner Klasse, Position oder weiteren Werten zugeordnet werden.

Die Integration des realen Fahrzeugverhaltens geschieht im vorliegenden Ansatz mittels eines Abbilds des realen Versuchsträgers. Während in typischen SIL- bis HIL-Testumgebungen beispielsweise Mehrkörpermodelle zur Abbildung der Fahrzeugdynamik Anwendung finden, erfordert der vorliegende Ansatz lediglich die Modellierung von vier Attributen :

- eine geometrische Modellierung des Fahrzeugs (bspw. mittels eines CAD-Modells)
- die Sensoranbringung am Fahrzeug
- die Modellierung des physikalischen Erfassungsprinzips des Sensors
- Übernahmezeitpunkt für Lokalisierung des Realfahrzeugs

Zusätzlich sind sensorspezifische Modelle und Parameter für die Initialisierung und den Betrieb über den Proxy notwendig, so dass Mechanismen, wie Handshakes, Diagnose und weitere, durchgeführt werden können.

Die geometrische Modellierung des Versuchsträgers unter Berücksichtigung der Sensoren erlaubt es schließlich, die, mittels exterozeptiven Sensoren erfassten, Messgrößen in einen einheitlichen Bezug zu einem Fahrzeugkoordinatensystem zu setzen. Nur so können Kamerasensordaten, Punktwolken und daraus abgeleitete Umgebungselemente um das Fahrzeug einheitlich repräsentiert werden. Hierzu wird eine extrinsische Sensorkalibrierung des realen Fahrzeugs benötigt, um diese auf den digitalen Zwilling abzubilden. Eine geometrische Fahrzeugsensorkonfiguration lässt sich in Form einer allgemeinen, externen Kalibriermatrix  $V$  formalisieren, die für sämtliche  $m$  exterozeptive Sensoren  $S_1, \dots, S_m$  die Positionierung in Bezug auf ein fahrzeugfestes Basiskoordinatensystem modelliert:

$$V = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{3 \times 3}^{S_1} & t_{3 \times 1}^{S_1} & \mathbf{R}_{3 \times 3}^{S_2} & t_{3 \times 1}^{S_2} & \dots & \mathbf{R}_{3 \times 3}^{S_m} & t_{3 \times 1}^{S_m} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 & \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 & \dots & \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{pmatrix} \quad (4.29)$$



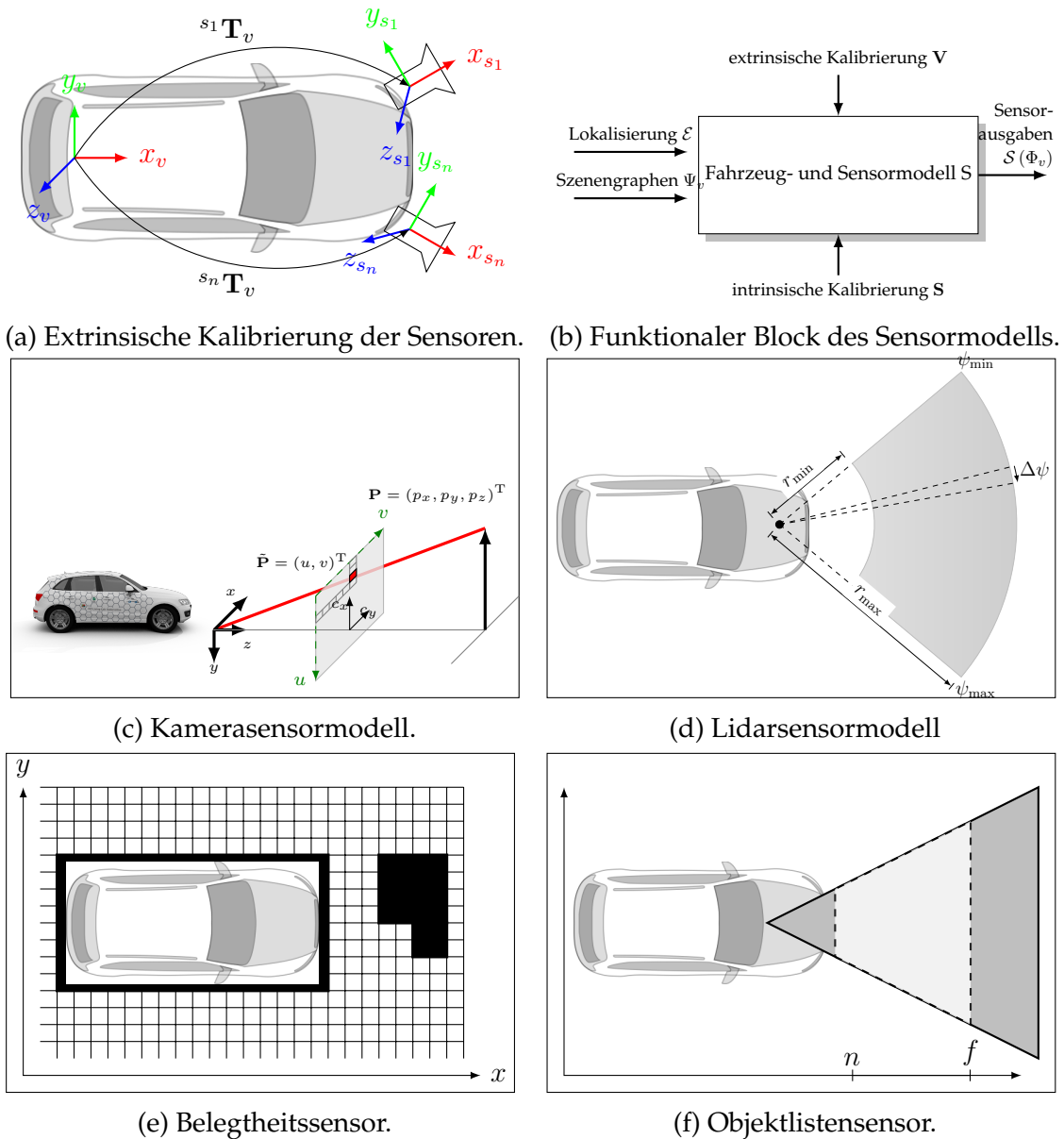


Abbildung 4.24: Digitaler Zwilling des Versuchsträgers mit Sensormodell zur Einbindung in das Testsystem unter Berücksichtigung des physikalischen Erfassungsprinzips und Sensorwirkweise.

Ebenfalls werden für jeden Sensor spezifische, intrinsische Parameter  $S$  benötigt, die abhängig vom physikalischen Erfassungsprinzip sowie dem Kalibriermodell des jeweiligen Sensors sind. Abbildung 4.24 gibt einen Überblick über die Funktionsweise der angesprochenen Sensorsimulation und Umweltmodellierung, die aus einer virtuellen Umgebung  $\Psi$  gespeist werden. Da eine hochautomatisierte Fahrfunktion typischerweise auf einen Verbund von homogenen wie auch heterogenen Sensoren setzt, müssen zur Bedienung dieser Fahrfunktionen ebenfalls Verbünde der Sensor- und Umweltmodelle parallel geschaltet werden.



## Kamerasensor

Die Modellierung von virtuellen Kamerasensoren basiert im Wesentlichen auf geometrischen Bezügen, beziehungsweise den Gesetzen der Optik [272], innerhalb der 3D-modellierten Welt einer Simulationsumgebung [273]. Dies wird typischerweise über Rendering-Verfahren, wie Shaderpipelines, Raycasting oder „Physical-based Rendering“ [274], umgesetzt. Es erlaubt somit die Abbildung des systemischen Kameraverhaltens in eine Simulationsumgebung, um synthetische Kamerabilder zu erzeugen.

So wird ein Szenenpunkt  $\mathbf{P}$  mit  $\mathbf{P} = (p_x, p_y, p_z)^T$  der 3D-modellierten Welt auf einen Pixel der Bildebene des virtuellen Sensors  $\tilde{\mathbf{P}} = (u, v)^T$  abgebildet, siehe Abbildung 4.24c. Eine virtuelle Kamera liefert also zu einem Simulationszeitpunkt  $t$  ein zweidimensionales Signal  $\mathcal{S}$  als Abbildung einer Pixelwertkoordinate auf einen Grau- oder entsprechend eines Farbraums definierten Farbwerts, bspw.

$$\mathcal{S}_{\text{cam}}: \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3 \text{ mit } (u, v) \mapsto (r, g, b) \text{ mit } r, g, b \in [0, 255] \quad (4.30)$$

Grundlegende Parameter, wie beispielsweise des einfachen Lochkameramodells  $\mathcal{S}$ , sind in Tabelle 4.3 aufgeschlüsselt. Diese können nach Aufgabenstellung um durch Linseneffekte induzierende Verzerrungsparameter ergänzt werden.

Bedeutung	Bezeichner	Einheit
effekt. horizontale und vertikale Brennweite	$f_u, f_v$	mm
Bildhöhe, bzw. -breite	$w, h$	px
Koordinate des Bildhauptpunktes $C$	$c_x, c_y$	px

Tabelle 4.3: Beispielhafte Parameter  $\mathcal{S}$  des Kamerasensormodells.

Zur Verwendung virtueller Kameradaten zur Augmentierung werden neben den reinen Pixelinformationen zusätzliche Grundwahrheitsattribute, wie die Disparität oder Tiefe eines Pixels zum abgebildeten Objektpunkt  $\mathbf{P}$  benötigt. Hierfür werden Tiefeninformationen durch Auslesen der Rendering-Pipeline oder Zugehörigkeiten aus panoptisch segmentierten Bildern genutzt. Für jeden Pixel wird eine eindeutige Objektidentifikation  $id$  sowie entsprechende Tiefe  $z$  im Messraum des Sensors  $(u, v)$  als zusätzliche Grundwahrheitssignale mitgeführt:

$$\mathcal{S}_{\text{cam,gt}}: \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2 \text{ mit } (u, v) \mapsto (id, z) \text{ mit } id \in \mathbb{N}, z \in \mathbb{R} \quad (4.31)$$

## Lidarsensor

Lidar-Sensoren können sowohl auf der Ebene der Laserscans  $\mathcal{I}_1$ , wie auch als mit der Datenverarbeitung integrierter Punktwolkensensor  $\mathcal{I}_2$  modelliert werden. Ein Lidar-Sensormodell für Laserscans basiert auf der Messung von Abständen und Speicherung in einer winkelförmig abgetasteten Sequenz, siehe Abbildung 4.25d. Formal ist das Sensormodell gegeben durch eine zweidimensionale, winkelförmige Abtastung der Umgebung mit einem diskreten Horizontalwinkel

$\psi$  und Vertikalwinkel  $\theta$  (siehe Tabelle 4.4), für die mittels eines emittierten Strahls der Abstand  $d$  zum nächst getroffenen Objekt modelliert wird. Die Abbildung der Umgebung mittels Laserscan ergibt sich aus:

$$\mathcal{S}_{\text{lidar}}: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^1 \text{ mit } (\theta_i, \psi_j) \mapsto d \quad (4.32)$$

Dabei wird auch hier als Grundwahrheit die Objektklassifikation des getroffenen Objektes modelliert:

$$\mathcal{S}_{\text{lidar,gt}}: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^1 \text{ mit } (\theta_i, \psi_j) \mapsto id \text{ und } i \in \{1, \dots, l\}, j \in \{1, \dots, k\}, id \in \mathbb{N} \quad (4.33)$$

In virtuellen Umgebungen können neben Raytracing, Raycasting sowie Auslesen des Tiefenpuffers des Grafikspeichers (engl. „depth buffering“) innerhalb einer Renderingpipeline für die Abbildung des systemischen Verhaltens von Lidarsensoren verwendet werden [Rosenberger et al., 2019a].

Bedeutung	Bezeichner	Einheit
minimaler und maximaler Sichtbereich	$r_{\min}, r_{\max}$	[cm]
minimaler und maximaler Azimuthwinkel	$\psi_{\min}, \psi_{\max}$	[rad]
minimaler und maximaler Elevationswinkel	$\theta_{\min}, \theta_{\max}$	[rad]
Azimuthwinkelinkrement	$\Delta\psi$	[rad]
Elevationswinkelinkrement	$\Delta\theta$	[rad]

Tabelle 4.4: Intrinsische Parameter S des Lidarsensors.

### Objektlistensensor

Als Objektlistensensor wird ein Sensor bezeichnet, der aus dem Szenengraphen  $\Psi$  der Simulation ein Teilumweltmodell in Form einer Objektliste  $X$  zu definierten Simulationszeitpunkten  $t$  liefert. Dieser Sensor arbeitet dabei typischerweise auf dem geometrischen Grundkörper eines Sichtkegelstumpfes (engl.: *view frustum*), um die Funktion der Objekterkennung eines Sensorsystems mit integrierter Datenverarbeitung zu approximieren. Abbildung 4.24f verdeutlicht das Erfassungsprinzip des Objektlistensensors. Modellerte und in diesem Sichtkegelstumpf liegende Elemente des Szenengraphen  $\Psi$  werden aggregiert und zum Simulationszeitpunkt  $t$  als Objektliste  $X$  mit  $X_t = \{x_t^1, x_t^2, \dots, x_t^n\}$  zurückgeliefert. Die einzelnen Verkehrsobjekte werden mit einer eindeutigen Kennung  $id$ , der zum Sensor relativ erfassten Position eines Objektreferenzpunktes  $(d_x, d_y)$ , der Absolutgeschwindigkeit  $(v_{\text{lat}}, v_{\text{lon}})$ , sowie mit zusätzlich beschreibenden Attributen, wie den Objektabmaßen  $(w, l)$ , dem Objekttyp  $c$  und dem Gierwinkel  $\psi$  beschrieben, die aus  $\Psi$  direkt messbar, oder ableitbar sind:

$$x_i = \{id_i, d_{x,i}, d_{y,i}, v_{\text{lat},i}, v_{\text{lon},i}, c_i, w_i, h_i, \psi_i\} \quad (4.34)$$

Die Größen werden i. d. R. sensorbezogen erfasst und mittels der Kalibriermatrix  $V$  auf das fahrzeugfeste Basiskoordinatensystem bezogen, siehe Tabelle 4.5.

Bedeutung	Bezeichner	Einheit
Abstand vordere, bzw. hintere Schnittebene	$n, f$	$[m]$
horizontales Sichtfeld	$\alpha$	$[rad]$
Seitenverhältnis	$a$	-
Objektklassenfilter	$c$	$\{\text{Fahrzeug, Fußgänger, Straßenmarkierung, ...}\}$

Tabelle 4.5: Beispielhafte Kalibrierparameter  $S$  des Objektsensors.

Weitere Annahmen, wie die Sichtbarkeitsprüfung aus der Sensorperspektive, die Filterung auf Klassen oder klassenspezifische Attribute der Verkehrsobjekte, können berücksichtigt werden. Der Objektlistensensor eignet sich daher insbesondere für eine Anregung der höherwertigen Algorithmik und Umweltbeschreibung bei der die erkannten Verkehrselemente verschiedener Detektoren zu einem Umweltmodell zusammengefügt und nachfolgenden Komponenten einer hochautomatisierten Fahrfunktion zugeführt werden.

### Belegtheitsgittersensor

Weiterhin lässt sich ein Umweltsensor definieren, der ein abstrahiertes Abbild der Verkehrssituation in Form eines Belegtheitsgitters erfasst. Er eignet sich somit als Grundlage ebenfalls dazu, bereits verarbeitete Sensordaten in Form von Umweltmodellen, wie Stixel- oder Voxelmodelle, zu erfassen und an weiterführende Injektionsebenen der hochautomatisierten Fahrfunktion, wie  $\mathcal{I}_3$ , zu liefern, siehe Abbildung 4.24e. Ein Belegtheitsgitter kann als eine gleichförmige Abtastung im zweidimensionalen Raum der direkten Umgebung des Fahrzeugs formalisiert werden, die über die externe Kalibriermatrix  $V$  typischerweise auf einen fahrzeugfesten Referenzpunkt bezogen wird. Die Sensorausgabe bezieht sich dabei bspw. über eine Erfassung eines Sichtbereiches von  $n \times m$  Metern, die sich mit  $x$  und  $y$  Zellen rechteckig und gleichförmig unterteilen lassen, siehe folgende Tabelle 4.6. Auch andere Sichtbereichsdefinitionen sind möglich. Die Zelle kodiert dabei ihre Belegung als

$$\mathcal{S}_{\text{grid}}: \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N} \text{ mit } x, y \mapsto \{0, 1\} \quad (4.35)$$

Die Grundwahrheit kann in Form des eindeutigen Objektbezeichners des Verkehrsobjekts angegeben werden, durch das die Zelle belegt ist:

$$\mathcal{S}_{\text{grid,gt}}: \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N} \text{ mit } x, y \mapsto id \quad (4.36)$$

Da der Sensor typischerweise fahrzeugfest fixiert ist, werden neben dem Gier-, auch Roll- und Nickwinkel auf den Sensor abgebildet. Dieses Vorgehen genügt möglicherweise in engen Umgebungen, wie dem Fahren auf mehrstöckigen Park Ebenen und -zuführungen, siehe auch Abschnitt 3.2.1, nicht mehr, und muss ggf. durch weitere Heuristiken ergänzt werden. Generell sind zwei Ansätze zur Erzeugung der Belegtheitskarte möglich: Zum einen können Funktionskomponenten der hochautomatisierten Fahrfunktion selbst zur Ableitung von Belegtheitsgittern genutzt werden, unterliegen dann den in der Algorithmik verkörperten Annahmen und Unsicherheiten. Zum anderen kann die Belegtheit direkt auf

#### 4 Entwicklung virtuell erweiterter Testfelder und Prüfgelände

dem Szenengraphen  $\Psi$  mittels Raycasting oder bildgebenden Verfahren ermittelt werden. Folgende Tabelle 4.6 stellt beispielhafte Parameter eines Lidar dar.

Bedeutung	Bezeichner	Einheit
longitudinaler, bzw. lateraler Sichtweite	$n, m$	$[m]$
longitudinale, bzw. laterale Zellenauflösung	$x, y$	Anzahl

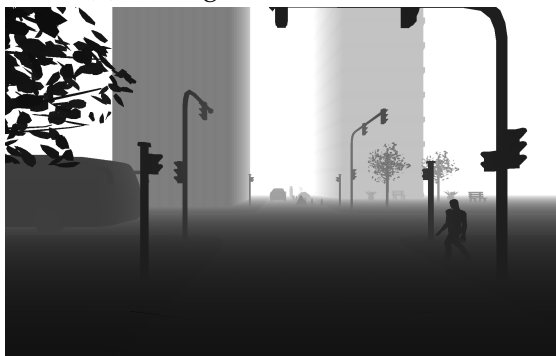
Tabelle 4.6: Beispielhafte Kalibrierparameter S des Belegtheitsgittersensors.



(a) Vorliegende Verkehrsszene.



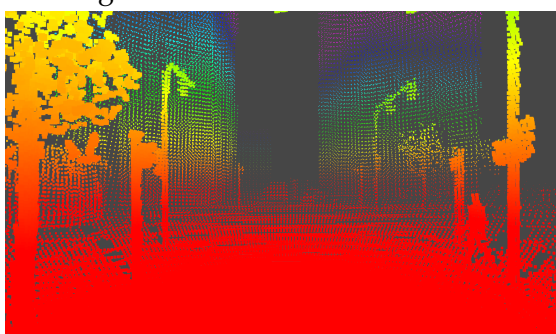
(b) Virtuelles Kamerasignal.



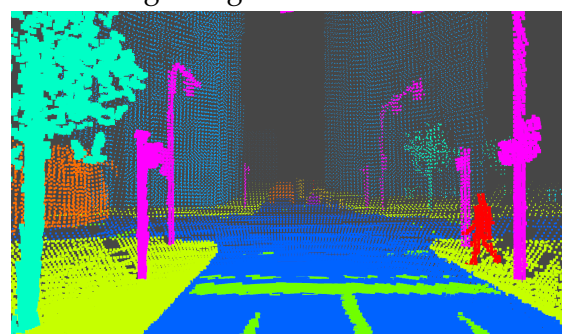
(c) Tiefenkarte: Zum Kameramodell zugehörige Grundwahrheit.



(d) Segmentierungskarte: Zum Kameramodell zugehörige Grundwahrheit.



(e) LiDAR Punktwolke aus Laserscansensormodell.



(f) Segmentierte Teilpunktwolken: Grundwahrheitssignal für Laserscandaten.

Abbildung 4.25: In den Messraum von Kamera- und Lidar-Sensoren transformierte Grundwahrheit der abgetasteten Objekte, wie die eindeutige Objektkennung, oder Abstand zum Objekt.

### 4.4.3 Durchführung mittels Strategien zur Augmentierung

Die vorgestellten Sensor- und Umweltmodelle werden genutzt, um an den vorgestellten Injektionsschnittstellen reale Umgebungen mit virtuellen Verkehrsaussagen zu überlagern. Am Beispiel eines Kamerasensormodells und LiDAR-Sensormodells wird nun jeweils ein Augmentierungsoperator  $\oplus$  definiert. Hierzu werden zwei exemplarische Sensormodelle diskutiert. Hierfür seien gegeben die Signale der realen Kamera  $E_r(\mathbf{x})$  und des virtuellen Kamerasignals  $E_v(\mathbf{x})$  mit jeweils  $\mathbf{x} = (u, v)^T$ . Ebenso seien das reale Laserscanner-Signal  $L_r(\theta, \psi)$  und das virtuelle Laserscanner-Signal  $L_v(\theta, \psi)$  definiert.

#### Ersetzungsstrategie

Mittels der Ersetzungsstrategie werden die realen Sensordaten vollständig mit den virtuellen Sensordaten überschrieben. Dabei werden anstelle der realen Daten die virtuellen Kamerabilder aus einer, innerhalb einer Simulationsumgebung parametrisierten, Sensormodell an die hochautomatisierte Fahrfunktion weitergereicht. Dieser Ansatz findet typischerweise bei HIL oder Prüfstandsanwendungen Einsatz.

Bei einer entsprechenden Aktivierung des Steuereingangs mit  $z = 1$  an der Stellvertreterkomponente reduziert sich Formel 4.28 zu:

$$\Pi(\mathbf{v}, \mathbf{r}) = \mathcal{S}(\Phi_v) \quad (4.37)$$

Das resultierende, an die Hochautomatisierungsfunktion weitergereichte Kamerabild ergibt sich hierzu durch eine vollständige Überlagerung und Maskierung  $\mathbf{I}$ :

$$E_{\Pi}(u, v) = \mathbf{I} \cdot E_v(u, v) + \mathbf{0} \cdot E_r(u, v) \quad (4.38)$$

Die Ersetzungsstrategie kann ebenso für Laserscannerdaten angewendet werden: Die radial in den Dimensionen Azimuth und Elevation erfassten Distanzwerte des realen Laserscanners werden vollständig durch die Messungen des virtuellen Laserscanners ersetzt:

$$L_{\Pi}(\theta, \psi) = \mathbf{I} \cdot L_v(\theta, \psi) + \mathbf{0} \cdot L_r(\theta, \psi) \quad (4.39)$$

#### Die $\min()$ -Strategie

Der Augmentierungsoperator  $\min()$  berücksichtigt jeweils die nähere Umgebung des Sensors ohne konkrete Objektkonstellationen zu berücksichtigen. Insbesondere bei der Nutzung auf Freiflächen und Prüfgeländen ohne bauliche Strukturen kann dieser daher verwendet werden. Während die besagte Grundwahrheit der Distanzwerte für die virtuellen Signale aus der Simulation herkommen, sind diese für die reale Szene fahrzeugseitig durch Referenzmesssensorik oder aus der

Infrastruktur und Lokalisierungsmesssystemen verfügbar und können in ein virtuelles Sensorbild überführt werden. .

Für ein augmentiertes Kamerasensorbild mit der Distanzgrundwahrheit  $D(u, v)$  ergibt sich somit die Augmentierung mittels

$$E_{\Pi}(u, v) = \begin{cases} E_v(u, v), & \text{wenn } D_v(u, v) < D_r(u, v) \\ E_r(u, v), & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.40)$$

Da die Tiefe in Laserscanner-Sensordaten explizit mitkodiert ist, werden lediglich die minimalen Distanzwerte jeweils aus dem realen und virtuellen Laserscan entsprechend der horizontalen und vertikalen Strahlen übernommen. Auch hier wird die entsprechende Grundwahrheit in Form der Distanzwerte benötigt, um ein konsistentes augmentiertes Signal zu erhalten.

$$L_{\Pi}(\theta, \psi) = \min(L_v(\theta, \psi), L_r(\theta, \psi)) \quad (4.41)$$

### Die $\delta$ -Strategie

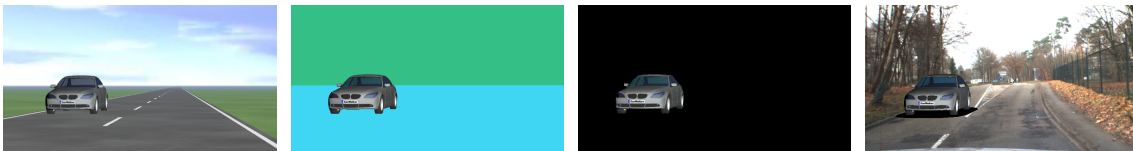
Hier werden die Laserscans an der Schnittstelle übernommen, für die der virtuelle Laserscan auf einem Objektpunkt  $j$  von einem vorab definierten virtuellen Objekt  $k$  trifft. Zusätzlich zur Grundwahrheit wird das Objektlabel der Grundwahrheit bei der Augmentierung von Bilddaten mit berücksichtigt.

$$L_{\Pi}(\theta, \psi) = \delta_{jk} \cdot f_{\text{virt}}(\theta, \psi) + (1 - \delta_{jk}) \cdot f_{\text{real}}(\theta, \psi) \quad (4.42)$$

Dies gilt ebenso für Laserscannerdaten:

$$L_{\Pi}(\theta, \psi) = \delta_{jk} \cdot f_{\text{virt}}(\theta, \psi) + (1 - \delta_{jk}) \cdot f_{\text{real}}(\theta, \psi) \quad (4.43)$$

Die Realisierung ist dabei stark abhängig von den unterschiedlichen, eingesetzten Sensormodellen und insbesondere den Simulationsumgebungen, in die diese eingesetzt sind. Die folgende Abbildung 4.26 zeigt die schematische Augmentierung eines realen Kamerabildes mittels der Simulationsumgebung IPG CarMaker, Abbildung 4.27 stellt die Augmentierung auf Lidar-Laserscans dar.

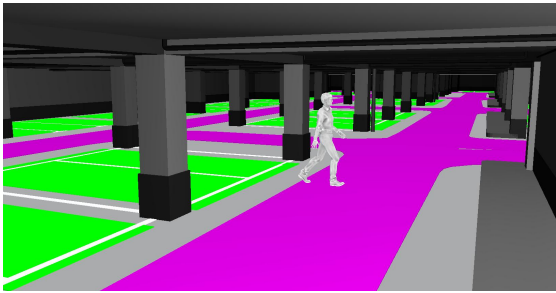


(a) Virtuelle Kamera-sensordaten. (b) Semantische Segmentierung. (c) Extraktion des Fahrzeugs. (d) Augmentierung des Kamerabilds.

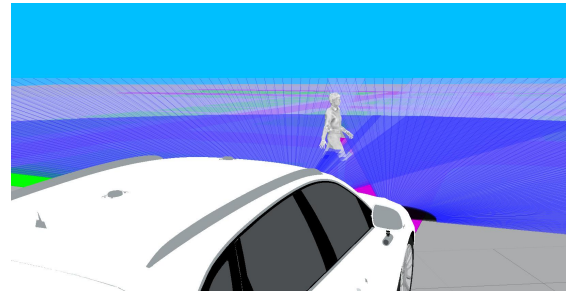
Abbildung 4.26: Augmentierung realer Kameradaten mit Kamera-Sensormodells IPG CarMaker Video Data Stream. (a) und (b) aus [Zofka et al., 2014b], © 2014 IEEE.



#### 4.4 Analyse, Modellierung und Injektion von Umweltmodellen



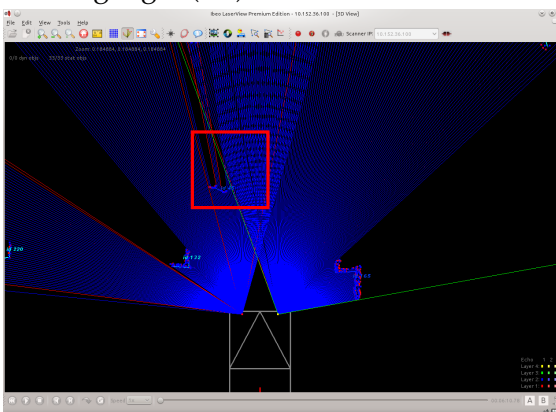
(a) Modellierung des Szenarios mit Lanelets (rosa) und Parkplätzen (grün). in Gazebo Sim.



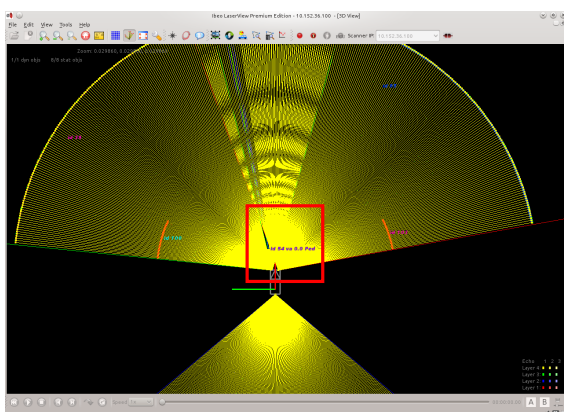
(b) Abtastung der relevanten Objekte in der virtuellen Szene durch ein Lidar-Sensormodell in Gazebo Sim.



(c) Darstellung der augmentierten Laserscandaten im Frontend des Fusionssteuergeräts innerhalb des Experimentalfahrzeugs CoCar mit realer Säule (grün) und virtuellem Fußgänger (rot).



(d) Ergebnis der  $\min()$ -Strategie.



(e) Ergebnis der  $\delta$ -Ersetzungsstrategie.

Abbildung 4.27: Augmentierung der Lidar-Fusionseinheit mit augmentierten Laserscans. Rechtecke kennzeichnen die Fußgänger-Detektion durch das Steuergerät. Darstellungen optimiert und angelehnt an Veröffentlichung [Zofka et al., 2018a], © 2018 IEEE.

### 4.5 Umsetzung eines vernetzten Testsystems

Der vorliegende Abschnitt integriert die in den Abschnitten 4.2 bis 4.4 entwickelten Modelle und Methoden mittels einer vernetzten und verteilten Testsystemarchitektur, siehe auch [Zofka et al., 2020, Zofka et al., 2023]. Das Testsystem fußt dabei wesentlich auf einer verteilten Co-Simulation zur Augmentierung der Prüfgelände und Testfelder auf Basis des digitalen Zwillings und den in den Test eingebetteten zu prüfenden, hochautomatisierten Fahrfunktionen. Es ermöglicht somit ein gefahrenloses Zusammenspiel mit den verletzlichen Verkehrsteilnehmern. Der Leitstand als gemeinsame Steuerungszentrale und Schnittstelle zu einem überwachenden Operator koordiniert die Konfiguration und Durchführung des Tests. Damit werden zwei Ziele verfolgt: Einerseits wird eine Skalierung auf mehrere reale Versuchsträger und virtuelle Versuchsteilnehmer erreicht. Andererseits wird die für die sensordatenbasierte, augmentierte notwendige Grundwahrheit für die Berücksichtigung von Verdeckungen und Tiefeneffekte erzielt.

Hierzu wird in Abschnitt 4.5.1 ein allgemeiner Überblick über die Software- und Hardwarearchitektur des Testleitstands gegeben. In Abschnitt 4.5.2 wird die softwareseitige Umsetzung der Co-Simulation beschrieben. In Abschnitt 4.5.3 werden schließlich die Testdurchführung und Testausführung innerhalb des Leitstands vorgestellt, die Operator und Sicherheitsfahrer, beziehungsweise den Testingenieur mittels einer geeigneten Mensch-Maschine-Schnittstelle, unterstützen.

Die Verbindung der einzelnen Beiträge ermöglicht dabei die gesamtheitliche Auswertung des resultierenden Testsystems im anschließenden Kapitel 5.

#### 4.5.1 Überblick über die Gesamtarchitektur

Die Gesamtarchitektur des Testsystems gliedert sich in drei Bestandteile auf, die verschiedene beteiligte Software- und Hardwarekomponenten berücksichtigen, siehe auch Abbildung 4.28:

Innerhalb des Versuchsträgers sind die Komponente mit der hochautomatisierten Fahrfunktion (engl.: „*automated driving unit*“, ADU), das fahrzeugseitige Steuergerät (engl.: „*online testsystem*“, OTS) für die Testdurchführung und Anbindung an die ADU sowie das für die Kommunikation zuständige Kommunikationssteuergerät (OBU) verbaut. Das OTS übernimmt dabei die Lokalisierung (für welche die Eigenschaft der Grundwahrheit angenommen wird), die Ausführung der Proxy-Komponenten und damit Sensorsimulation innerhalb des Fahrzeugs, sowie weitere Diagnosefunktionalität. Die OBU übernimmt die kabellose Kommunikation zwischen dem OTS und den straßen- und backendseitigen Testsystemkomponenten. Die straßenseitige Infrastruktur nimmt als Bestandteil des Testsystems die Signale des Fahrzeugs sowie weiterer straßenseitiger Akteure zur Einflussnahme auf die Verkehrsszene, wie Lichtsignalanlagen oder Zufahrtsschranken, entgegen. Die straßenseitige Testsystem-Infrastruktur besteht aus RSU, benannten Akteuren sowie Anbindung an das Testsystem-Backend.



Das Testbackend nimmt die Daten aller im Testverbund befindlichen, straßenseitigen Einheiten entgegen, aggregiert und liefert diese einer auf dem digitalen Zwilling operierenden globalen Verkehrssimulation zu. Sie aggregiert die hierfür notwendigen Signale der verschiedenen straßenseitigen Einheiten und nimmt weiterhin das Fußgängerverhalten immersiver Verkehrsteilnehmer aus den verbundenen VR-Umgebungen entgegen. Aus einem zentralen Umweltmodell, der Basissimulation, werden die Zustände sämtlicher modellbasierter oder datengetriebener Avatare den Versuchs- und Testfahrzeugen im Feld über die Kommunikationssteuergeräte der straßenseitigen Infrastruktur zugespielt. Abbildung 4.29 stellt den Datenfluss zwischen der zu prüfenden, hochautomatisierten Fahrfunktion und einem immersiven Fußgänger dar. Schließlich steht dem zuständigen Testingenieur zur Überwachung und Steuerung des Testverlaufs eine Bedienoberfläche bereit.

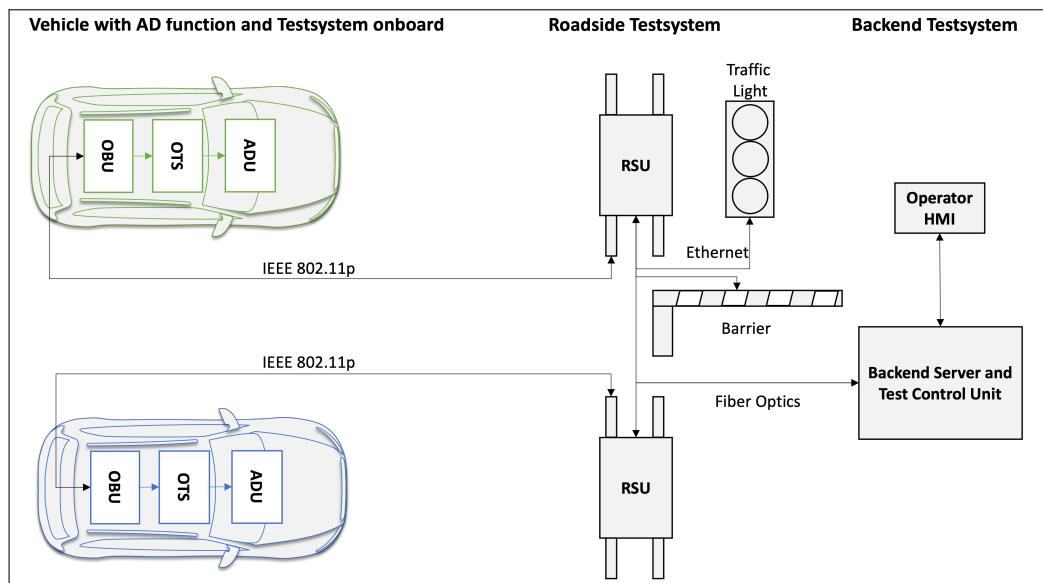


Abbildung 4.28: Die Gesamtarchitektur erlaubt die Integration mehrerer Versuchsfahrzeuge. Die Vernetzung zwischen den Fahrzeugen und den Testsystemkomponenten ist dabei Bestandteil des Testsystems. Darstellung leicht modifiziert aus [Zofka et al., 2023], © 2023 IEEE.

Das infrastruktur- und fahrzeugübergreifende Testsystem besteht als System of Systems aus einer Vielzahl von Hardware- und Softwarekomponenten, die miteinander agieren. Daher ist eine Zustandsüberwachung dieser im Testleitstand und auf dem Fahrzeug integrierten Komponenten unabdingbar. Diese besteht im Wesentlichen aus drei Bestandteilen:

- Komponentenspezifische Erfassung der Zustände
- Aggregation dieser zu Komponentenverbünden und -monitoring
- Visualisierung der Zustände auf Verbunds- und Einzelkomponenten-Ebene und ggf. Information des Bedieners.

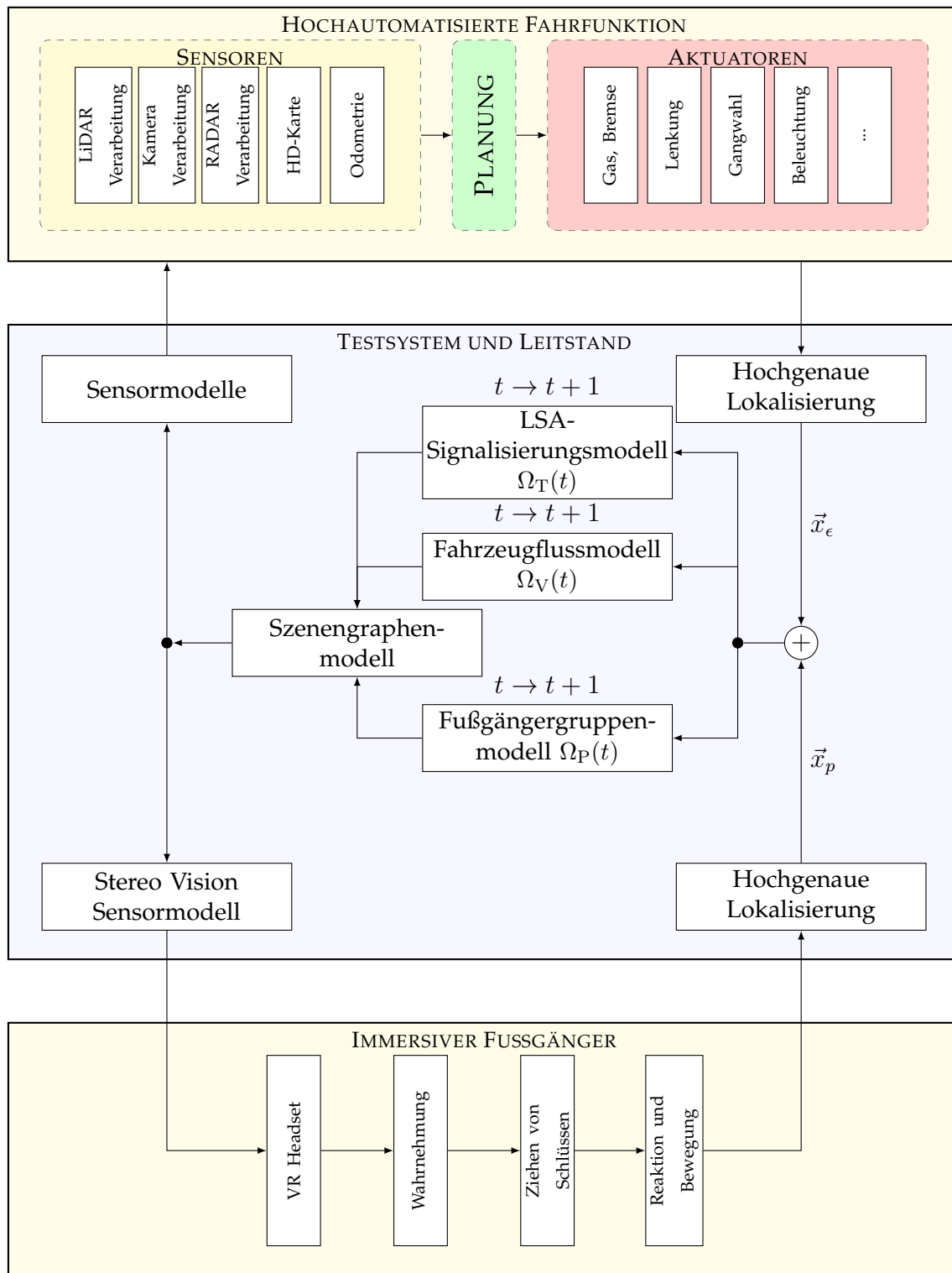


Abbildung 4.29: Konzeptueller Feinüberblick einer Testleitstandsarchitektur. Im Testsystem und Leitstand fließen die verschiedenen Verhaltensmuster, modellbasiert wie datengetrieben, zusammen. Darstellung entlehnt und übersetzt aus [Zofka et al., 2020], Original: © 2020 IEEE.

In den jeweiligen Komponenten erfolgt eine Bestimmung der Zustände der Sensoren, Kommunikationseinheiten sowie der verarbeitenden Algorithmen. So werden beispielsweise Messfrequenzen einzelner Sensordaten, interne Zustandsgrößen der Lokalisationskomponente, wie Satellitenanzahl und Messgenauigkeit, oder auch der Kommunikationskomponenten, wie Senderate oder auch Verlustrate der Nachrichten, zwischen den straßen- und fahrzeugseitigen Steuergeräten bemessen. Diese Indikatoren werden komponentenweise gebündelt. Die gesammelten Diagnosedaten<sup>6</sup> geben Aufschluss über die Konsistenz der Daten und damit Zuverlässigkeit über den Verlauf und das Ergebnis der Testdurchführung. Eine einheitliche Ansicht des Testdurchlaufs und der benannten Zustandsgrößen, informiert den Bediener des Testsystems, siehe folgende Abbildung 4.30.

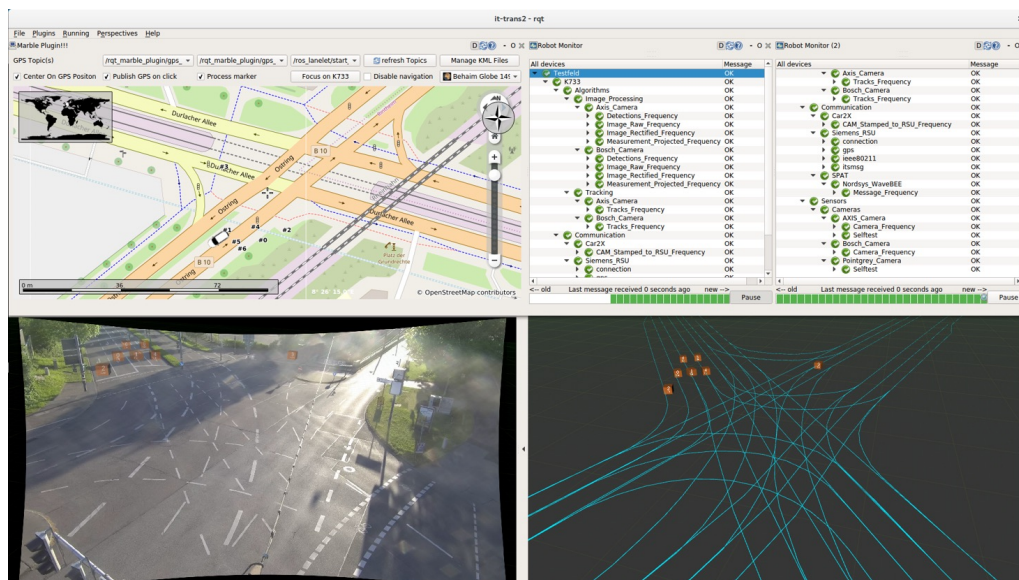


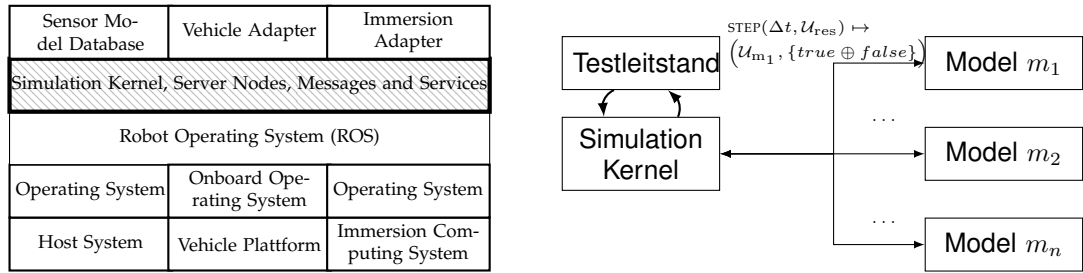
Abbildung 4.30: Die Benutzeroberfläche erlaubt dem Bediener einen Überblick in Komponentenzustände und die Verkehrssituation im Testfeld.

### 4.5.2 Software-Konzept der Co-Simulation verteilter Modelle

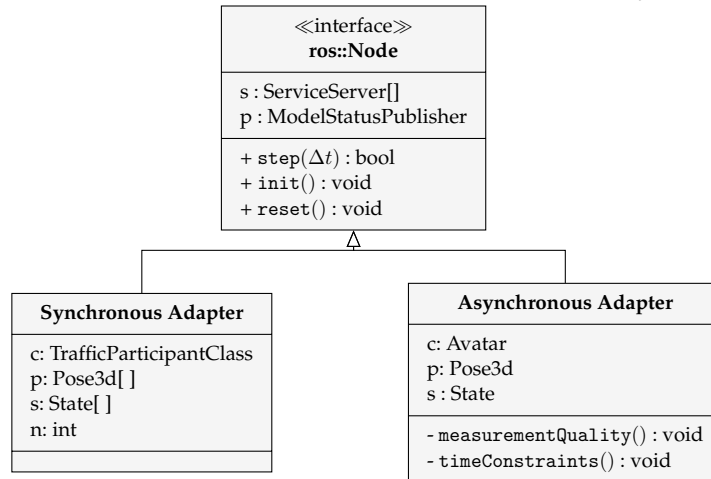
Zur Verknüpfung der verschiedenen Beiträge wurde eine verteilte Co-Simulationsarchitektur auf Basis des Robot Operating System (ROS) Frameworks [47] entwickelt [Zofka et al., 2020]. Diese wurde dabei auf Basis eines Schichtenmodells konzipiert, siehe Abbildung 4.31a. Zum Aufbau der Kommunikationsschicht wurde hierbei auf die Interprozesskommunikation von ROS gesetzt, welches sowohl eine synchrone als auch asynchrone TCP- oder UDP-Kommunikation über Nachrichten und entfernte Methodenaufrufe erlaubt. Das vorliegende Konzept basiert somit, gemäß der Begrifflichkeiten nach Geimer, vgl. Abschnitt 2.6, auf der Kopplung auf Programmebene. Hierbei wird die Steuerungsfunktion von dem Simulationskernel, einem dedizierten ROS-Knoten, übernommen, siehe Abbildung 4.31b.

<sup>6</sup>Angewendete Diagnosekonzepte werden in [Orf et al., 2024] weiter ausgeführt.

#### 4 Entwicklung virtuell erweiterter Testfelder und Prüfgelände



(a) Schichtenmodell des verteilten Testsystems. (b) Die Co-Simulation agiert dabei auf Basis eines verteilten Systems.



(c) Expertenmodelle werden über synchrone ROS-Adapter, reale Versuchsträger und immersive Fußgänger über asynchrone ROS-Adapter angebunden.

Abbildung 4.31: ROS-basierte Co-Simulation als Grundlage des Testsystems. Darstellungen aus Veröffentlichung [Zofka et al., 2020], Original: © 2020 IEEE.

Das Software-Konzept basiert auf einer verteilten Co-Simulation, die expertenwissenbasierte Modelle, reale Versuchsträger und immersive Fußgänger gemeinsam und zeitgleich in ein Umweltmodell versetzt. Für jedes der Modelle, beziehungsweise der hierfür einzubindenden Referenzmesssysteme, wird die Anbindung über einen entsprechenden ROS-Knoten mit entsprechenden Schnittstellen, siehe Abbildung 4.31c, realisiert. Der Simulationskern bietet die grundlegenden Verwaltungs- und Steuerungskomponenten der Simulation dem Testleitstand an. Er triggert über die Interprozesskommunikation sequentiell in fester Reihenfolge die verschiedenen Expertenmodelle und Avatarmodelle für die immersiven, am Test teilnehmenden Fahrzeuge und Fußgänger, und bietet den einzelnen Modellen jeweils eine vollständige Sicht des gemeinsamen Umweltmodells an. Dies erlaubt, die Verhaltens- und Teilnehmermodelle über verschiedene Rechnersysteme und -architekturen hinweg verteilt zu betreiben.

Abbildung 4.32 skizziert das Verhalten des Simulationskerns für die Phasen des Initialisierung und der Propagation in der Testdurchführung und transparenten Handhabung von synchronen und asynchronen Adaptern. Der Simulationsker-

nel kümmert sich um den planmäßigen Ablauf: Vor der eigentlichen Simulation werden im Konfigurationsschritt CONFIG() zuerst die Verfügbarkeit der ausgewählten Modelle geprüft, bevor in der Initialisierung INIT() notwendige Parameter zur Parametrierung von Szenarien an die Modelle übergeben werden. Während der eigentlichen Simulation im Propagationsschritt STEP() werden durch den Kernel Modell für Modell - und damit die entsprechenden Verkehrsobjekte wie immersives Fahrzeug oder Fußgänger - getriggert. Pausieren PAUSE() oder Beenden der Simulation STOP() ergänzen die Steuermöglichkeiten.

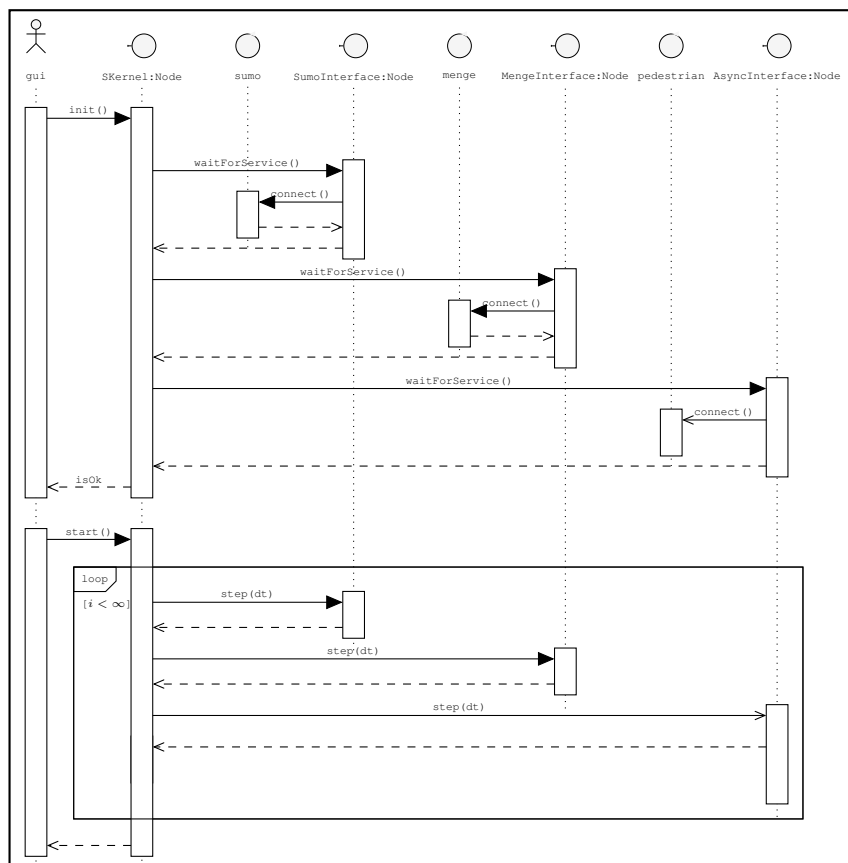


Abbildung 4.32: UML-Sequenzdiagramm skizziert Vorgehen des Kerns, der Expertenmodelle synchron und beteiligte Fahrzeuge oder Menschen asynchron einbindet. Darstellung aus [Zofka et al., 2020], © 2020 IEEE.

Diese Art der modularen Anbindung erlaubt die Integration verschiedener Simulationsmodelle und Anbindung an Simulationsframeworks. Sind weder Fahrzeug noch immersiver Fußgänger beteiligt, erhält man durch obiges Vorgehen Determinismus. So wurden für die im Laufe der vorliegenden Forschungsarbeit durchgeführten Experimente Fahrdynamikmodelle des IPG CarMaker, siehe [Schwab et al., 2014], Verhaltensmodelle mit SUMO und Menge [194] in [Zofka et al., 2020], oder auch Sensorsimulationen, wie Gazebo Sim [Zofka et al., 2016b], integriert und gekoppelt. Immersive Fußgänger wurden mittels Adapter für die Unity und Unreal Engine [Zofka et al., 2020] integriert.

### 4.5.3 Kommunikation zwischen Infrastruktur und Fahrzeug

Um eine Integration der bisherigen Konzepte über ein Fahrzeug hinweg zu ermöglichen, wurde ein Verfahren zur kabellosen Integration zwischen dem mit der hochautomatisierten Fahrfunktion ausgestatteten Versuchsträger und dem immersiven Fußgänger über das umspannende Testsystem entwickelt [Zofka et al., 2023]. Die Konzeption des Kommunikationsmechanismus mit Protokoll und Datenaustausch wurde anhand folgender Anforderungen aus den bisherig vorgestellten Teilkonzepten angeleitet:

Testdurchläufe unterliegen einerseits den prüfgelände-, andererseits aber auch fahrzeug- und damit augmentierungsspezifischen Modellen und Parametern. So können innerhalb eines Prüfgeländeversuches gar verschiedene Injektionsschnitten einer Fahrfunktion (vgl. Abschnitt 4.4.1) variiert werden. Ebenso erlauben verschiedene Prüfgelände und Testfelder durch ihre Struktur unterschiedliche zu erprobende Szenarien, die durch das vorgestellte Fähigkeitenmodell eingeschränkt sind (vgl. Abschnitt 4.2). Diese müssen daher zu Beginn einer Testdurchführung abgeglichen und auch parametrisiert werden können, sodass ein Ein- und Auskoppeln des Fahrzeugs möglich ist.

Die Zustände der virtuellen wie auch realen Verkehrs- und Testteilnehmer müssen mittels der vorgestellten Infrastruktur direkt beobachtbar oder ableitbar sein (vgl. Abschnitt 4.2.3). All diese Zustände müssen zwischen dem fahrzeug- und infrastrukturseitigen Testsystems ausgetauscht und geupdatet werden, um die Systembewertung zu ermöglichen. Gleichzeitig sollen mehrere reale Teilnehmer in eine Testdurchführung miteinbezogen werden, wobei lediglich das Verhalten eines Prüflings bewertet werden soll. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die Lokalisierung mit Grundwahrheitscharakter prüflingsseitig erfolgt.

Die Aufgabe der Testdurchführung wird in folgende Teilaktivitäten aufgeteilt: Initialisierungsphase, Testphase sowie Nachbearbeitungsphase, s. Abbildung 4.33.

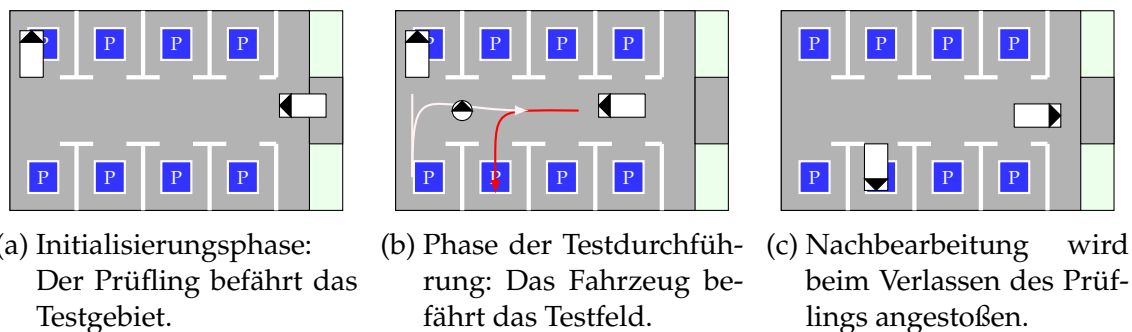


Abbildung 4.33: Phasen der Testdurchführung am Beispiel eines AVP-Systems: Der Prüfling befährt das Testgebiet mit einem bereits virtuell parkenden Fahrzeug. Während die Funktion ausgeführt wird, wird ein virtueller Fußgänger injiziert, der sich dem virtuellen Fahrzeug annähert. Schließlich wird das Szenario evaluiert. Bildquelle: [Zofka et al., 2023], © 2023 IEEE.

## Initialisierungsphase

Die in den Beobachtungsbereich des Testfelds oder Prüfgelände eintretenden Fahrzeuge melden sich mit einer Eigenkennung und -pose bei der straßenseitigen Infrastruktur des Testsystems an. Zur Unterscheidung der zu prüfenden Fahrzeuge und weiteren, vernetzten Fahrzeugen in der Umgebung findet ein Registrierungs- und Kopplungsschritt zwischen Infrastruktur und zu testendem Fahrzeug statt. Ist dieser erfolgreich, erfolgt ein Abgleich der folgenden notwendigen Informationen, indem die infrastrukturseitige Testsystem folgenden Austausch initiiert:

Das infrastrukturseitige Testsystem übermittelt an das OTS die Fähigkeiten des vorliegenden Testfelds oder Prüfgeländes. Zusätzlich übermittelt die Infrastruktur das zu testende Szenario. Dies beinhaltet die zu befahrene (Teil-)Strecke, Startbedingungen wie eine Zielgeschwindigkeit, Anzahl der Testteilnehmer (sofern a priori bekannt), sowie weitere Größen.

Durch das fahrzeugseitige OTS werden an die infrastrukturseitige Testinfrastruktur die Fähigkeiten des Fahrzeugsystems übermittelt. Dabei bestimmt die zu testende Hochautomatisierungsfunktion die Auswahl der zur Verfügung stehenden und für den Test anzuwendenden Sensormodelle  $\mathcal{S}$ , sowie der entsprechend zu nutzenden Injektionsschnittstellen  $\mathcal{I}$  und damit zu variierenden Parameter.

## Durchführungsphase

Die Durchführung ist wie folgt strukturiert: Im sogenannten Check-In Prozess klinkt sich das Fahrzeug über einen definierten, räumlichen Bereich (Check-In Bereich) auf dem Prüfgelände in den Testbereich mit ein. In diesem Check-In Bereich müssen die dynamischen Rahmenbedingungen unter Berücksichtigung der jeweils vorgegebenen Toleranzen als Grundvoraussetzungen erfüllt sein. Sind die Rahmenbedingungen erfüllt, treten Fahrzeug, Infrastruktur und die zugrunde liegende Simulation in die eigentliche Testphase ein, ansonsten wird der Test zurückgesetzt. In der eigentlichen Testphase werden kontinuierlich Referenzposition und Umgebungsmodell ausgetauscht. Die Infrastruktur bemisst kontinuierlich Metriken zur Bewertung des Testvorgangs und verfolgt den Prozessfortschritt. Die Testsequenz wird stetig auf Einhaltung bestimmter Rahmenbedingungen, wie in Tabelle 4.7 dargestellt, geprüft. Diese können im Anschluss zur Bewertung des Testergebnisses herangezogen werden.

Gütemaß	Beschreibung	Bedingung
Anzahl Satelliten	GPS-Signalqualität	$n \geq 4$
Frequenz RX CA-Nachrichten	Interferenzen, Verdeckungen	$f_{\text{eff}} \geq 1 \text{ Hz}$
Frequenz RX TS-Nachrichten	Interferenzen, Verdeckungen	$f_{\text{eff}} \sim f_{\text{target}} \text{ Hz}$
Signalstärke (RSSI)	Qualität des Funksignals	$\delta > -70 \text{ dbmW}$
Verlustrate	Qualität des Funksignals	$o < 25\%$

Tabelle 4.7: Beispielhafte, bei der Testdurchführung kontinuierlich zu überwachende Rahmenbedingungen.

### Nachverarbeitungsphase

Die Nachverarbeitungsphase ist wie folgt strukturiert: Im sogenannten Check-Out Prozess verlässt das Fahrzeug die Testzone. Fahrzeug, Sicherheitsfahrer oder Testingenieur werden informiert. Die zur Bewertung erforderlichen Daten werden nachgeglättet, bewertet und dem Fahrzeug schließlich mitgeteilt. Gegebenenfalls erfolgt eine Übergabe an den Test-, beziehungsweise Sicherheitsfahrer.

### Kommunikationsprotokoll

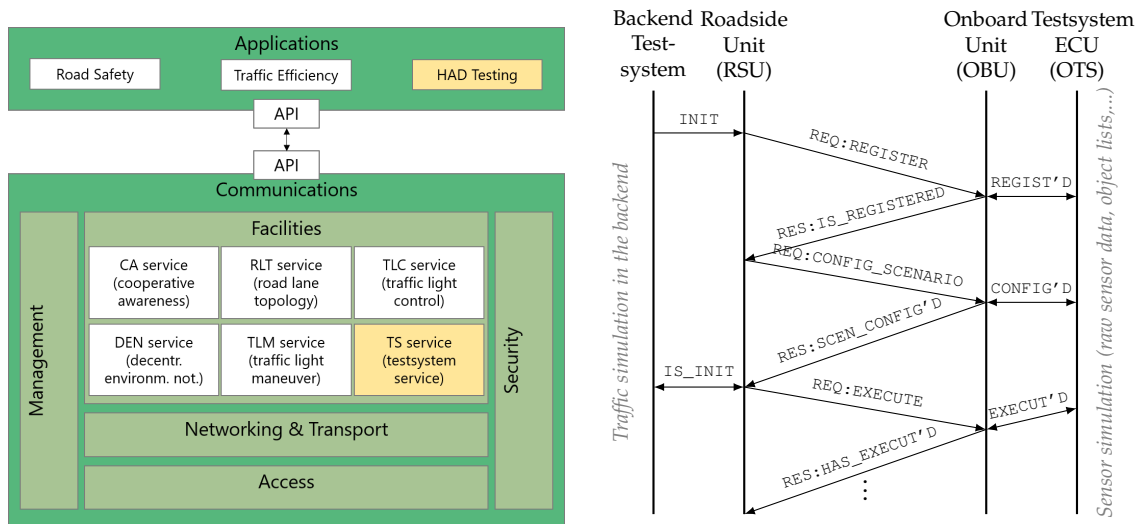
Bei der drahtlosen Kommunikation nach dem V2X-Standard IEEE 802.11p / ETSI ITS-G5 handelt es sich um eine unzuverlässige Kommunikation. Daher wurden auf Applikationsebene verschiedene Beobachterstrukturen, basierend auf den identifizierten Größen, implementiert, um Ausfälle erkennen zu können. Abbildung 4.34a skizziert die typische ETSI ITS-G5-Referenzarchitektur für OBU und RSU. Vergleichbar mit existierenden Diensten (CA-, DEN-, etc.) innerhalb der ETSI ITS-G5-Referenzarchitektur wurde ein Dienst für das Testsystem entwickelt, sodass über definierte Schnittstellen Zugriff auf interne Messgrößen wie GPS, Sicherheitsfunktionen und unteren Schichten des Protokollstapels zur Versendung und zum Empfang von Datenpaketen besteht. Über eine Zustandsautomat werden dabei die verschiedenen benannten Phasen vom infrastrukturseitigen Testsystem durchlaufen und die OTS im Fahrzeug informiert, siehe Abbildung 4.34b.

Einen solchen Dienst zeichnet dabei zwei wesentliche Komponenten aus: die Nachrichtendefinition und Sende- sowie Empfangsalgorithmen. Zur Kommunikation zwischen fahrzeug- und infrastrukturseitigem Testsystem wurde ein dediziertes Paketformat entworfen, siehe Abbildung 4.34c. Der Nachrichtenheader stellt dabei jeweils eindeutige Kennzeichnungen der OTS des Prüflings und der RSU dar. Nachrichtenklasse und -typ kennzeichnen jeweils die Aufforderungen der infrastrukturseitigen an die fahrzeugseitige OTS zum Wechsel des Zustands und die jeweilige Bestätigung oder Absage des Fahrzeugs. Der Szenario-Container kodiert die Fähigkeiten des Testfeldes, die jeweilige Karte als Referenz und die Szenarienkonfiguration von Infrastruktur an Fahrzeugseite.

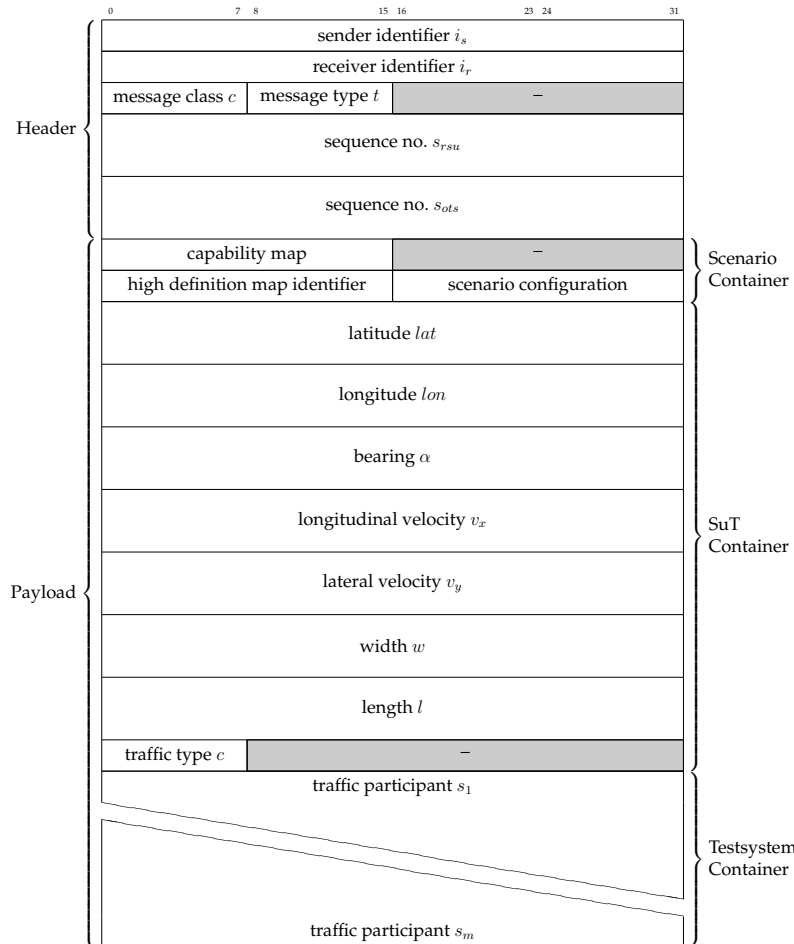
Die Übertragungsverwaltung (engl.: „*transmission management*“) setzt die Aktivierung und Terminierung des Übertragungsvorgangs um, bestimmt die Übertragungsfrequenz und triggert die Erstellung einer Nachricht. Das Empfangsmanagement (engl.: „*reception management*“) kümmert sich bei Eintreffen einer neuen Nachricht um deren Dekodierung, prüft ggf. die Validität der Nachricht und bereitet die enthaltenen Informationen für weitere Applikationen auf. Der Versand und Empfang der Datenpakete erfolgt dabei direkt, ohne eine Priorisierung oder Anpassung der Sendefrequenz entsprechend der Inhalte des Datenpakets, um einen möglichst hochfrequenten Austausch zu gewährleisten. Bei einer Integration in Kreuzungen von Testfeldern des öffentlichen Raums führt diese Herangehensweise potentiell zu einer verringerten Zustellungsrate (engl.: „*paket delivery ratio*“) aufgrund von Konflikten mit anderen ITS Diensten, siehe Abb. 4.34a.



## 4.5 Umsetzung eines vernetzten Testsystems



(a) Einordnung des Dienstes in ETSI ITS-G5 Referenzarchitektur. (b) Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur.



(c) Datenpaket zur Kommunikation zwischen Testsystem in der Infrastruktur und im Fahrzeug. Die im Header mitgeführten Metadaten erlauben jeweils die Beurteilung der Phasenübergänge. Payload kodiert und transportiert Nutzinformation zur Initialisierung und Durchführungsphase. Breite der Darstellung ist an 4 Bytes ausgerichtet.

Abbildung 4.34: Einbettung der Protokollimplementierung in die bestehende ITS-S Referenzarchitektur. Bildquelle: (a) [Zofka et al., 2023], © 2023 IEEE. (b) und (c) leicht modifiziert ggü. [Zofka et al., 2023].

## 4.6 Zusammenfassung

Zu Beginn des vorliegenden Kapitels wurden die in Kapitel 3.3 identifizierten Kategorien der Verkehrsszenerie, des Verkehrsteilnehmerverhaltens und der Schnittstellen des Testobjekts als Injektionspunkte für eine Abbildung auf das Milgram-Kontinuum gewählt. Der wesentliche Beitrag des daraus entstandenen Metamodells erlaubt es Instanzen für Testsystemkonfigurationen zu bilden und mittels der Augmentierungsgrade hinsichtlich Virtualität und Realität zu bewerten und zu vergleichen.

Die wesentlichen Beiträge des Metamodells und der kategoriespezifischen Augmentierungsgrade gehen mit folgenden weiteren Beiträgen der vorliegenden Arbeit einher. Diese bilden essentielle Bausteine für die virtuell erweiterten Prüfgelände und Testfelder:

- Beschreibung der Fähigkeiten von virtuell erweiterten Prüfgeländen und Testfeldern mit Fokus auf Verkehrsszenerie und Erfassung beteiligter Fahrzeuge über smarte Infrastruktur
- Erfassung von vulnerablen Verkehrs- und Testteilnehmern zur Immersion als Testingenieur, Mitfahrer oder Proband und zur Verhaltensabbildung in das Umweltmodell
- Injektionsschnittstellen mit Fokus auf Kamera- und Lidar-basierte Systeme zur Zuführung an ADAS oder HAD

Das Zusammenspiel der verschiedenen Beiträge macht eine Integration zwischen Fahrzeug und Infrastruktur unabdingbar. Daher wurde schließlich ein Konzept für den notwendigen Informationsaustausch entwickelt. Die bisherigen Beiträge werden mit einem vernetzten Testsystem, der notwendigen, verteilten Co-Simulationsarchitektur, den fahrzeug- und infrastrukturseitige Testsystemkomponenten, und der drahtlose Kommunikation zur Einbindung des Versuchsträgers mit weiteren, virtuellen Teilnehmern in ein gemeinsames Umweltmodell, konzeptuell vereint. Die beispielhafte Umsetzung erfolgt mit IEEE 802.11p und ETSI ITS-G5.

Die für die jeweiligen Modellcontainer vorgestellten beispielhafte Modellinstanzen sind als exemplarische, motiviert durch in Kapitel 3 aufgezeigte Anwendungsfälle des hochautomatisierten Fahrens zu verstehen. Sie stellen damit nur einen Ausschnitt der möglichen Modellcontainer dar. Wesentliche Anforderungen an die in den Modellcontainern repräsentierenden Modellen werden durch die Spezifikationen der zu betrachtenden ADAS oder HAD als System-under-Test gestellt. So müssen die Augmentierungsgrade konkret an dem SuT, den verfügbaren Prüfgeländen und Testfeldern, und dem abzubildenden Verhalten definiert werden. Diese sind dann eindeutig und konsistent für die Testsystemkonfigurationen zu fixieren. Sie sind damit nicht notwendigerweise zwischen verschiedenen Fahrfunktionen und Prüfgeländekombinationen vergleichbar.

## 5 Evaluation

Das vorliegende Kapitel präsentiert die Evaluation ausgewählter Bausteine der entwickelten Methodik. Aus dem zugrundeliegenden Metamodell können verschiedene Testsysteminstanzen eines real-virtuellen Kontinuums auf Prüfgeländen und Testfeldern mittels der vorgestellten und charakterisierten smarten Infrastruktur erstellt werden. Die Evaluation wird dabei wesentlich angeleitet aus den Bedarfen zweier bereits eingeführter hochautomatisierter Fahrfunktionen, zum einen des Automated Valet Parking Systems und zum anderen des automatisierten Personentransport entlang der letzten Meile. Die Betriebsbereiche der beiden automatisierten Fahrfunktionen stellen damit die Rahmenbedingungen für die Anwendung und damit Bewertung von konkreten, mittels des Metamodells erstellten, beispielhaften Modellen.

Das Kapitel ist wie folgt strukturiert: Die Strategie zur Auswertung der entwickelten Verfahren wird im anschließenden Abschnitt 5.1 vorgestellt. Es folgt eine Einführung in das verwendete, repräsentative Prüfgelände des Testfeld Autonomes Fahren Baden-Württemberg in Kapitel 5.2. Die Augmentierung des digitalen Zwillings mit statischen Verkehrsszenarioelementen wird in Kapitel 5.3 vorgestellt. An das resultierende Szenariomodell knüpft sich Kapitel 5.4 an und beleuchtet insbesondere die Aspekte der Augmentierung von datengetriebenen Verkehrsteilnehmerverhalten. In Kapitel 5.5 werden die Exposition und Injektion in beispielhafte Funktionen hochautomatisierter Fahrfunktion bewertet. Schließlich wird in Kapitel 5.6 die Umsetzung der mittels ETSI ITS-G5 umgesetzten, verteilten Simulationsumgebung diskutiert. Abschließend wird in Abschnitt 5.7 eine Zusammenfassung vorgenommen.

Auf Basis des vorliegenden Experimente- und Evaluationskapitels findet dann im daran anschließenden Kapitel 6 eine gesamtheitliche, rückblickende Betrachtung und kritische Auseinandersetzung mit dem Erreichten statt.

### 5.1 Vorgehen zur Evaluation

Im Gegensatz zur Bewertung von Methoden, Verfahren und Algorithmen ist eine empirische oder analytische Bewertung einer Methodik nur schwer möglich. Es wird daher der Ansatz verfolgt, diese durch Anwendung innerhalb konkreter Anwendungsfälle zu bewerten. Die Methodik wird daher anhand ihrer konkreten Umsetzung und der Instanziierung verschiedener Testsystemkonfigurationen an konkreten Beispielen skizziert. Dabei wird im Wesentlichen auf qualitative, wo möglich auch quantitative, Bewertungsmethoden, zur beispielhaften Messdatenauswertung und Beurteilung der Fahrfunktionen und der Testsystemfunktionen zurückgegriffen, um die Vorteile einzelner methodischer und algorithmischer Bausteine herauszustellen.

Die vorgestellte Methodik setzt bereits reale und virtuelle Bestandteile von Verkehrsszenarien miteinander in Bezug und legt der Anwendung innerhalb der Evaluation Betriebsbereiche konkreter hochautomatisierter Fahrfunktionen zugrunde. Daher findet eine Anwendung an den realen Zielsystemen, den Versuchsträgern und der smarten Infrastruktur, statt. Durch den Einsatz mehrerer Versuchsträger des FZI, der umgerüsteten Individualfahrzeuge Cognitive Car (CoCar), Cognitive Car Next Generation (CC-NG) sowie des automatisierten Shuttle ELLA auf Basis eines EASYMILE EZ10, wird somit eine fahrzeugtypübergreifende Anwendbarkeit demonstriert.

Der erste Anwendungsfall stellt das bereits in Kapitel 3.2.1 vorgestellte **Valet Parking System** von Individualfahrzeugen in den Fokus. Dieser Anwendungsfall skizziert den *Szenario-to-Go* Ansatz. Dabei wird ein Prüfgelände mithilfe eines vollständigen Parkhausinnenraums mit Gebäude-, Straßen- und Parkraumstrukturen augmentiert. Diese augmentierte Welt wird dann in Form von Punktwolken der Lidar-basierten Selbstlokalisierungsfunktion des AVP zugeführt, die gefahrenlos evaluiert und dabei mit GNSS/INS-basiertem Referenzmesssystem verglichen werden kann.

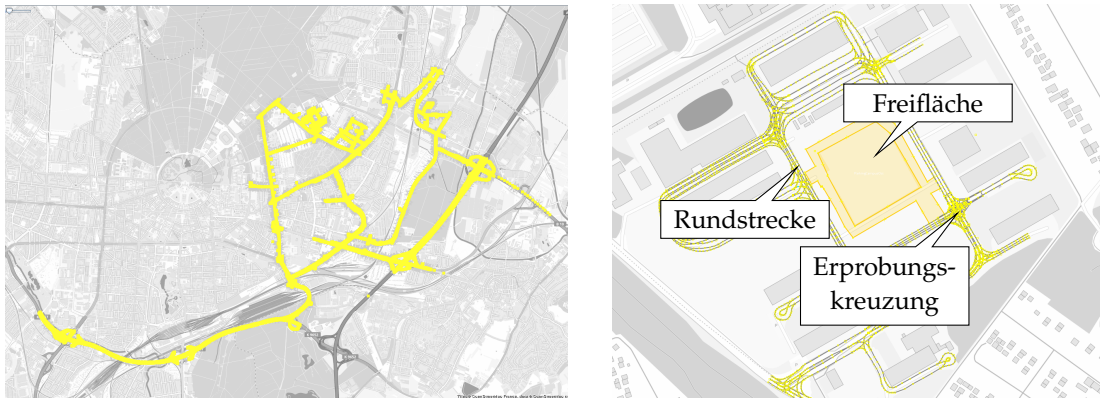
Der zweite Anwendungsfall stellt den **Shuttle-Betrieb auf der letzten Meile** dar, siehe Kapitel 3.2.2. Hierzu wird ein gegebenes Streckennetz um virtuelle Haltestellen und Fußgängerüberwege erweitert, um die Robustheit der Fahrfunktion zu evaluieren. Die Augmentierung mit statischen und dynamischen Elementen, wie Passagieren und Passanten, erzeugt dabei nicht unwesentliche Verdeckungen, modellbasiert wie auch über die datengetriebene Immersion. Es steht bei der Injektion die Manipulation von Kameradaten von Personen, Fahrrädern und parkenden Fahrzeugen im Vordergrund.

Schließlich wird ein erster Schritt zum Nachweis einer Vernetzung über Fahrzeuggrenzen hinweg untersucht, um den Versuchsträger mit datengetriebenen, immersiven Probanden oder modellbasierten Fahrzeuge in einem Umgebungsmodell zu vereinen.

## 5.2 Das Erprobungsgelände des TAF-BW

Die Erforschung und prototypische Umsetzung der Methodik fand auf dem Testfeld Autonomes Fahren Baden-Württemberg (TAF-BW) statt. Dieses wird seit 2016 stetig weiterentwickelt und schließt sowohl im öffentlichen als auch nicht-öffentlichen Straßenverkehrsraum liegende Streckenzüge ein, die mittels stationärer Infrastruktur ausgestattet sind, oder mittels mobiler, smarter Infrastruktur ergänzt werden können. Abbildung 5.1a visualisiert dabei den nördlichen Ausschnitt des Streckenzugs des TAF-BW, der hochpräzise kartiert, sowie an wesentlichen Kreuzungspunkten mit Multikerasensorik, Verarbeitungs- und Kommunikationseinheiten im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeiten ausgestattet wurde [Fleck et al., 2018].

Als wesentliches Instrument zur Evaluation dient das Erprobungsgelände des TAF-BW, siehe Abbildung 5.1b. Als ehemaliges Kasernen- und heutiges Campusgelände Campus Ost des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) zeichnet es sich durch charakteristische Streckenzüge eines urbanen Wohnquartiers, sowie einer freien Fahrdynamikfläche aus. Als abgesperrtes, dem öffentlichen Verkehrsraum nicht zugehöriges Gelände, können dort beliebige Mess- und Erprobungsfahrten, insbesondere mit noch nicht nach StVZO zugelassenen Fahrzeugen, durchgeführt werden. Als exemplarisches Prüfgelände bietet es somit die idealen Voraussetzungen für die Erprobung der vorliegenden Konzepte.



(a) Nördlicher Streckenverlauf in Karlsruhe. (b) Erprobungsgelände KIT Campus Ost.

Abbildung 5.1: Hochgenaue Karten des TAF-BW (gelb). Darstellung auf Basis von OSM-Karten. © OpenStreetMap-Beitragende.

Der Aufbau des digitalen Zwillings geschieht über das Fähigkeitenmodell, siehe Abschnitt 4.2.1. Die erste Ebene der Szenerie des Fähigkeitenmodells stellt die hochgenaue Karte dar, zu deren Erstellung verschiedene Datenquellen herangezogen werden können. Einerseits dient eine hochgenaue, die Fahrstreifen und Fahrbahnbegrenzungen abbildende Llet als Grundlage des digitalen Zwillings. Sie beschreibt den befahrbaren Straßenbereich und ermöglicht die Ableitung eines CAD- oder eines Straßentexturmodells, wie in [Zofka et al., 2016b] zur

Modellierung der Fahrbahnfläche in Gazebo Sim. Da die Vermessung von weiteren Szenerieelementen, wie Gebäudestrukturen oder statischen Sichthindernissen, mit einem Messfahrzeug nur erschwert möglich ist, wurden diese in Form von 2D-Polygonen aus der öffentlich zugänglichen Datenquelle OSM mittels der Werkzeugkette der Simulationsumgebung SUMO abgeleitet. Zusätzlich wurde ein entsprechendes Straßennetzwerk zur Bewegung virtueller Agenten für die spätere, vereinfachte Erprobung der Vernetzung geschaffen.

Damit sowohl die Lanelet mit den straßenseitigen Begrenzungen, als auch die durch OSM generierten Szenerieelemente, in einem gemeinsamen Referenzkoordinatensystem dargestellt werden können, wurde eine gemeinsame Abbildungsvorschrift der sphärischen Koordinaten mit einem eindeutigen Referenzpunkt gewählt. Um die Abbildung beider Datengrundlagen zu prüfen und den plausiblen Überlapp zwischen digitalem Modell und Realität zu validieren, wurden in [Zofka et al., 2016b] Mess- und Testfahrten durchgeführt. Dabei wurden wesentliche Markierungen in der Umgebung, wie Gebäude, Kurven sowie die Fahrzeuge abgeglichen, indem die eigene Fahrzeugposition in SUMO projiziert wurde. Während eindeutig ein- oder zweispurige Straßenzüge abgebildet werden, zeigen sich insbesondere bei Straßenzügen mit unklaren Spuren oder großflächigen Kreuzungsbereichen (Erprobungskreuzung) Herausforderungen der automatisierten Ableitung des Straßenmodells.

Weiterhin wurde für vorgenommene Ableitung des digitalen Modells angenommen, dass eine planare Oberfläche für die Genauigkeit der Testzwecke ausreichend die realen Gegebenheiten approximiert, beziehungsweise der dabei entstehende Fehler vernachlässigbar und somit der axiomatische Charakter der Grundwahrheit erfüllt ist.

Die zweite Ebene des Fähigkeitenmodells handhabt die Referenzmesssysteme. An einem Peitschenausleger der Erprobungskreuzung des Campus Ost wurden ein Multi-Lidarsystem sowie zwei V2X-Kommunikationseinheiten, siehe Abbildungen 5.2b und 5.2c, angebracht. Das Multi-Lidarsystem wurde dabei so ausgerichtet, dass es Verkehrsteilnehmer auf der Fahrbahn entlang der Nord-Süd-Ausrichtung erfasst und wurde mittels des Messfahrzeugs CC-NG und der überlappenden Sensorbereiche kalibriert, siehe Abbildung 5.2d.

Die dritte Ebene beschreibt die Vernetzung zwischen Fahrzeug und der smarten Infrastruktur selbst. Neben der reinen Erfassbarkeit von Signalen wird zusätzlich der RSSI-Wert als Indikator für die Konnektivität, bzw. Erreichbarkeit, genutzt, siehe auch Abbildungen 5.2e und 5.2f. Mit zunehmender Distanz fällt die Erreichbarkeit - beobachtbar durch einen abfallenden RSSI-Wert - wesentlich ab. Ebenfalls wird ersichtlich, dass die fahrzeugseitige Erfassung der von der RSU ausgesendeten Signale und RSU-seitige Erfassung der von der fahrzeugseitigen verbauten OBU relativ symmetrisch sind. Abschließend beschreibt die Ebene der Aktuierung die Eingriffsmöglichkeiten selbst, beispielsweise kann die Eingriffsmöglichkeit auf die Lichtsignalanlage mittels Parametersätze einzelner Signalprogrammen oder -plänen im Modell repräsentiert werden.



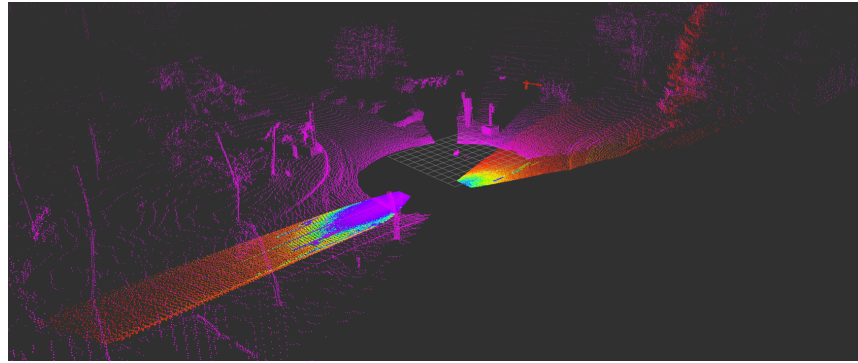
(a) Fahrbahn mit Pylonen als Kalibriermuster.



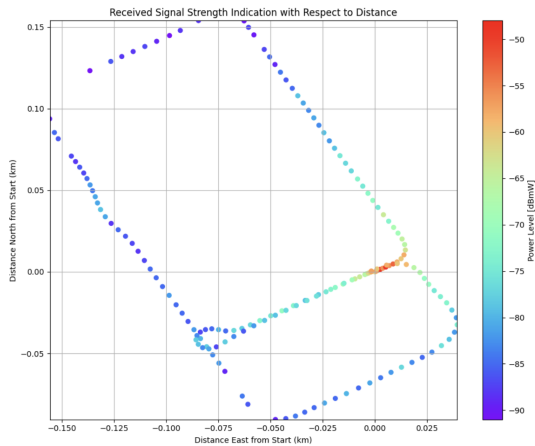
(b) RSU #1 und gegenläufig angebrachte Lidare am Peitschenausleger zur Erfassung der Nord-Süd Achse.



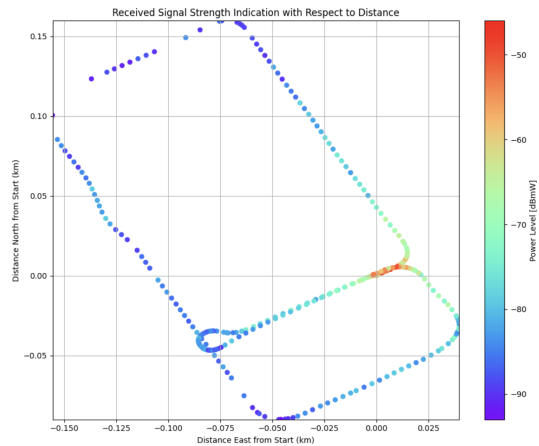
(c) An LSA integrierte, weitere RSU #2.



(d) Sensorieller Erfassungsbereich der Lidare (bunt) mit Überlagerung der Punktwolke der CC-NG-Punktwolke (lila). Bildquelle: R. Polley.



(e) Relative Signalstärke, gemessen mit OBU.



(f) Relative Empfangsstärke des Fahrzeugs in RSU #2.

Abbildung 5.2: Ausrüstung der Erprobungskreuzung des TAF-BW am KIT Campus Ost entlang Nord-Süd Ausrichtung mit dem Messfahrzeug CC-NG und Signalstärke zu RSU #2.



## 5.3 Augmentierung der statischen Umgebung

Der erste Schritt des Metamodells stellt die Augmentierung der statischen Verkehrsszenerie dar. Damit soll die Komplexität des Verkehrsszenarios erhöht werden, welches der Fahrfunktion gegenübergestellt wird, insbesondere wenn diese in der Realität nur aufwändig oder unter hoher Gefährdung der beteiligten Verkehrsteilnehmern oder Versuchsträger darstellbar wäre.

### 5.3.1 Augmentierung eines Parkhauses

Der typische Betriebsbereich des AVP-Systems findet innerhalb von Parkräumen, wie Parkhausinnenräumen und Parkhausfreiflächen, statt. Diese zeichnen sich aufgrund ihrer Gestaltung zumeist durch enge Fahrkorridore und -spuren, Säulen und Wände und dadurch bedingte uneinsichtige Bereiche aus. Parkräume stellen sich insbesondere durch Mischflächen mit darauf agierendem Fußgänger- und Fahrzeugverkehr als herausfordernd dar. Die Fußgänger interagieren unmittelbar in direkter Nähe mit parkenden, rangierenden Fahrzeugen.

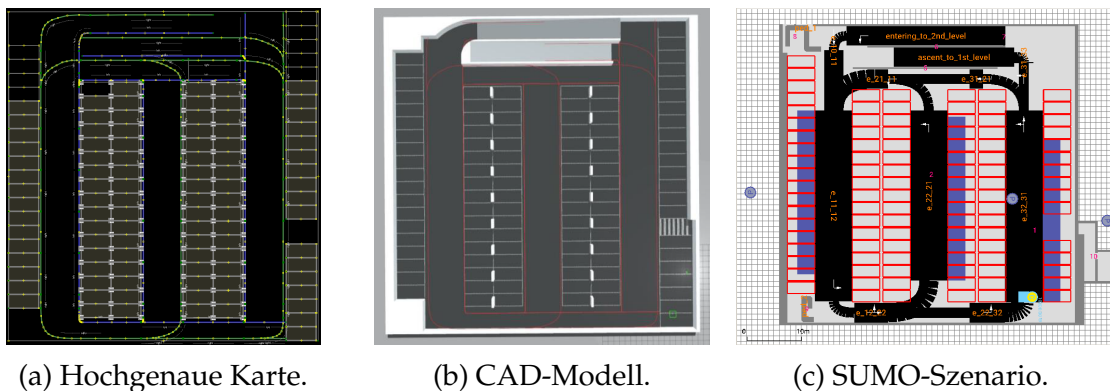


Abbildung 5.3: Abbildung des Untergeschosses der Parkgarage Fasanengarten, Karlsruhe. Open Access Veröffentlichung: [Schörner et al., 2022].

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Freifläche des Erprobungsgeländes um das Modell des Parkhauses Rintheimer Straße, Karlsruhe, sowie um das Modell des zweiten Untergeschosses des Parkhauses Fasanengarten, Karlsruhe, augmentiert. Die Abbildung der gezeigten Parkebene Fasanengarten besteht dabei aus verschiedenen Bestandteilen, die aus den Konstruktionsplänen erstellt wurden, siehe Abb. 5.3: Eine hochgenaue Karte im Lanelet-Format stellt Fahrbahnen, befahrbare Bereiche, Fußgängerwege und Parkplätze dar. Das CAD-Modell ergänzt diese um geometrische Strukturen mit durch Wände und Säulen bedingte Verdeckungen. Weiterhin wurde ein logisches Szenario innerhalb der Simulationsumgebung SUMO erstellt, welches die potentiell befahr- und begehbaren Bereiche modelliert und eine Belegung mit modellbasierten Fahrzeug- und Fußgängerverhalten erlaubt.

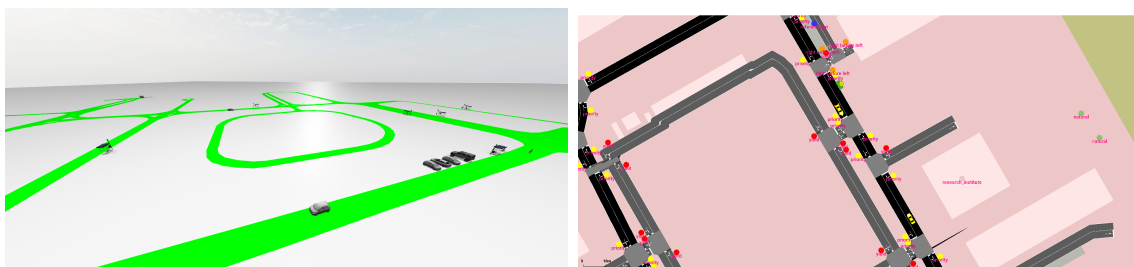


Über eine Projektion des Szenarios, der Umgebung des Straßenmodells in Form des CAD-Modells sowie der Straßenbeschreibung in SUMO, wird dieses auf die Freiflächenstruktur des TAF-BW Campus Ost augmentiert. Das Augmentierungsmodell erfährt dabei eine Koordinatensystemtransformation, so wird mittels der Wahl einer Abbildungsvorschrift, wie der skalierten Mercator-Transformation, und eines Referenzpunktes in WGS84-Koordinaten die Szene auf der im Zentrum des Erprobungsgeländes gelegenen Freifläche verortet werden.

#### 5.3.2 Augmentierung eines urbanen Wohnquartiers

Der Betriebsbereich der in Abschnitt 3.2.2 skizzierten Fahrfunktion zur Bewältigung der letzten Meile adressiert Straßenzüge in peri-urbanen Stadtquartieren. Innerhalb Geschwindigkeitsbereichen von bis zu 30 km/h werden Personen oder Waren transportiert. Der Betrieb eines solchen on-demand Shuttles basiert dabei auf realen Bestandshaltestellen oder virtuellen bedarfsgerecht eingerichteten Haltestellen.

Für die Evaluation dieser Anwendung wird die statische Umgebung des Erprobungsgelände entlang der äußeren Rundstrecke um Haltestellen einer urbanen Verkehrsszenerie sowie um parkende Fahrzeuge und ein abgestelltes Fahrrad ergänzt, siehe Abbildung 5.4a. Haltestellen wirken sich unmittelbar auf die Testmöglichkeiten für die Routenfindung aus. Somit können verschiedene Routen-, Manöver- und somit Trajektorienwahlen bis hin zur Sicherheitswabe (vgl. Abschnitt 3.2.2) evaluiert werden. Dies gilt insbesondere für An- und Abfahren zu und von Haltestellen als Zu- und Ausstiegsmöglichkeit von Fußgängern. Entlang der Haltestellen werden stehende Fahrräder berücksichtigt, bei denen sich eine Missklassifikation kritisch auswirken kann. Diese wie auch wartende, zukünftige Passagiere wirken innerhalb der Szene als Verdeckungen aus. Zur Personenbeförderung mit elektrischen Shuttle-Fahrzeugen sind weitere Elemente einer Verkehrsszene, wie Unfälle oder auch vorfahrtsregelnde Polizisten, denkbar.



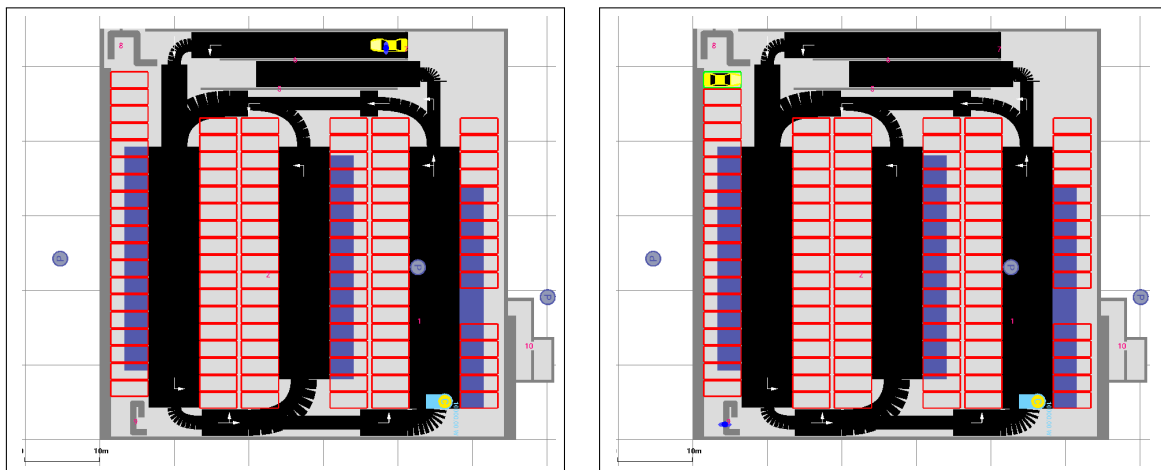
(a) CAD-Modelle und Lanelet-Modell mit augmentierten Haltestellen und parkenden Fahrzeugen. (b) Straßennetzwerk zur Anleitung von modellbasiertem Fahrzeug- und Fußgängerverhalten.

Abbildung 5.4: Augmentierung des TAF-BW Erprobungsgeländes mit statischen Elementen und Verkehrsteilnehmern.

## 5.4 Augmentierung von Verkehrsteilnehmern

Für die Dynamik innerhalb eines Verkehrsszenarios sieht das Metamodell die Augmentierung mit entsprechend der ODD zu erwartenden Verkehrsteilnehmern und deren Verhalten vor. Mit deren Berücksichtigung geht ebenfalls die Stimulation der Sensoren über gestalt- und oberflächenbeschreibende Eigenschaften einher, die im folgenden Kapitel berücksichtigt werden. Nachfolgend durchgeführte Evaluation stützt sich dabei hauptsächlich auf die in [Zofka et al., 2015, Zofka et al., 2018a, Zofka et al., 2018b] vorgestellten, datengetriebenen Verfahren zur Modellierung und Abbildung des Verkehrs.

Insbesondere um schnell und algorithmisch variierbares Verhalten zu erzeugen, eignen sich expertenwissenbasierte Modelle, wie beispielsweise das IDM. Mit probabilistischen Methoden lassen sich verschiedene Belegungen algorithmisch erzeugen (siehe Nachweis des vernetzten Testsystems), oder auch Interaktionsketten erzeugen. So zeigt folgende Darstellung 5.5 das Verhalten simulierter Fußgänger im gezeigten Parkhaus-Szenario auf.



(a) Fahrzeug fährt in Parkebene zum Parkvorgang ein.

(b) Fahrer nutzt Fußgänger aufweg (links unten).

Abbildung 5.5: Verhaltensmodellbasierte Modellierung der Interaktion von Fahrzeug und Fahrer. Straßenmodell (schwarz), Fahrzeug (gelb), Fußgänger (blau), Parkplätze (rot), Ladesäule (hellblau).

Das Prüfgelände TAF-BW Campus Ost wurde als starkes Basismodell mit entsprechenden Haltestellen und parkenden Fahrzeugen als statische Hindernisse augmentiert, siehe Abbildung 5.4a.

Im Folgenden wird auf den Beitrag der datengetriebenen, immersiven Integration von Probanden in der Rolle als Fußgänger fokussiert. Die Eignung der VR-basierten Integration für weitere Rollen wird in der Publikation [Gremmelmaier et al., 2022] untersucht.

### Datengetriebene Augmentierung von Passanten

Die datengetriebene Immersion des Probanden mittels VR verspricht gegenüber modellbasierten Verhaltenssimulation eine wesentlich anschaulichere, flexiblere und direkte Abbildung von unterschiedlichem Verhalten. Es können insbesondere die Interaktion zwischen Fußgängern und einer hochautomatisierten Fahrfunktion direkt dargestellt und evaluiert werden, die sonst nur beobachtbar und nicht intuitiv kontrollierbar ist. In einem für die spezifischen Betriebsbedingungen eines Shuttle-Betriebs typischen Verkehrsszenarios werden Verhaltensmuster erzeugt, über Sensoren erfasst und in der Simulation einer beispielhaften hochautomatisierten Fahrfunktion gegenübergestellt. Resultierende Verkehrssituationen werden anhand konkreter Metriken statisch analytisch bewertet und über den Space Time Cube interaktiv analysierbar gemacht.

Im Zuge der Forschungsarbeit wurde eine Erprobungsfläche zur Einbettung von Fußgängern aufgebaut und sukzessiv weiterentwickelt, vergleiche Abbildungen 4.19b und 5.6. Auf Basis der Erfahrungen der initial konstruierten und mittels Probandenstudie [1, Zofka et al., 2018b] validierten Umgebung, wurde die ursprünglich Smartphone-basierte Lösung um ein kommerzielles, auf Inside-Out Tracking basierendes System mit VR-Brille ersetzt. Dessen Immersionsfähigkeiten wurden in [Gremmelmaier et al., 2022] für Rollen, wie der des Sicherheitsfahrers oder Fußgängers, validiert. Die kabellose Erfassung der Kopfpose und Übertragung der virtuellen Sicht des immersiven Probanden erlauben eine Abbildung von Verhaltensmustern innerhalb eines Bereichs von bis zu  $7 \times 4\text{m}^2$ .

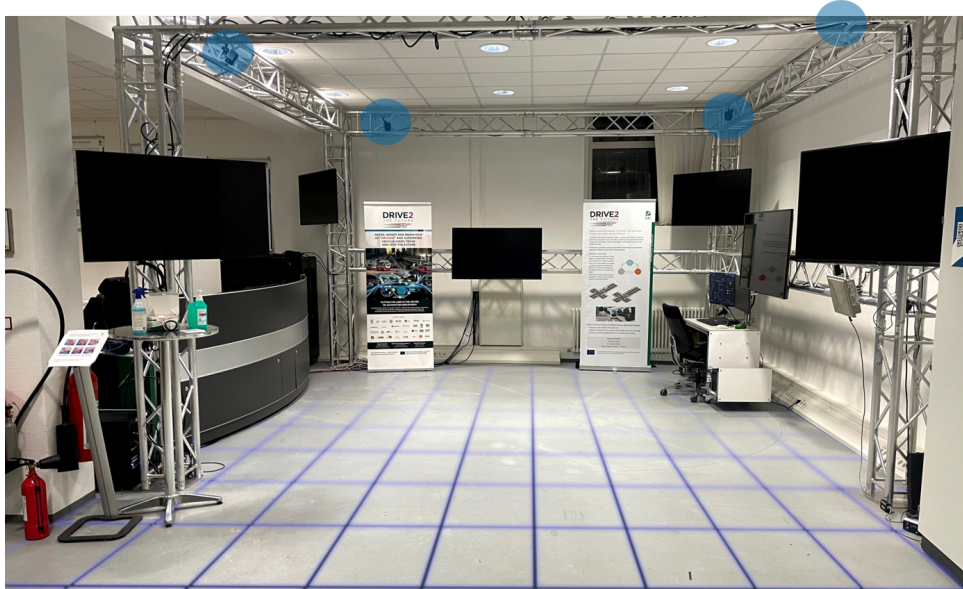


Abbildung 5.6: Kabelloses Tracking und Übertragung erlauben eine datengetriebene Immersion innerhalb der Erprobungsfläche im Mobilitätslabor des FZI über integrierte Sensorsysteme (blau umrissen) und VR-Brille. Darstellung entlehnt an [Gremmelmaier et al., 2022].

Die hochautomatisierte Fahrfunktion nach [275, 276] ist dabei auf eine Risikoschätzung der oft unklaren Intention von Fußgängern ausgelegt. Die zugrunde liegende Perzeption basiert dabei auf einer lidarbasierten Wahrnehmung der Umgebung. Die erfassten Laserscanner-Daten werden dabei sowohl als 3D-Punkte, wie auch innerhalb eines 2D-Belegtheitsgatters verwendet. Das Risiko wird in Manöver-, Trajektorienplanung und Absicherungsebene kontinuierlich geschätzt. Ein partikelschwarmoptimierungsbasierter Planer [Ochs et al., 2024] plant räumlich und zeitlich Trajektorien auf Basis des Umweltmodells. Dieses Risikobewusstsein soll für nachvollziehbares Fahrverhalten des automatisierten Fahrzeugs mit der Umgebung und damit Steigerung der Alltagstauglichkeit sorgen.

Als beispielhafte Grundlage eines Verkehrsszenarios wurde ein bestehendes Abbild des Prüfgeländes aus dem Forschungsprojekt SafeADArchitect [276] herangezogen. Dieses stellt neben einer einfachen geometrischen Darstellung auch verschiedene Oberflächentypen und Gebäude bereit, um eine möglichst realistische Immersion zu erlauben und wurde um eine Abbildung von Haltestellen ergänzt, die bei einer angestrebten Straßenquerung für eine statische Verdeckung des Fußgängers sorgt. Ein Proband erhält die Aufgabe, als immersiver Fußgänger die Straße zur gegenüber liegenden Seite zu queren, während sich ein automatisiertes Fahrzeug nähert. Dieser wird als 3D-Avatar integriert, dessen Körperpose aus der erfassten Kopfpose abgeleitet und Perzeption durch die VR-Brille geschieht. Im **Verkehrsszenario A** (Abbildung 5.7) soll der Proband auf unbedachte, aber rasche Art und Weise die Straße kreuzen, vergleichbar mit [Zofka et al., 2018b], wohingegen er in aufbauendem **Verkehrsszenario B** (Abbildung 5.8) die Fahrfunktion mittels gezielten Manöver („*step-in-step-out*“) herausfordern soll.

Im **Verkehrsszenario A** wird folgendes Szenario erzeugt: Der Proband wartet in seiner Rolle als Fußgänger hinter einer Haltestelle und soll vor einem herannahenden Shuttle die Straße zu queren. Abbildungen 5.7a bis 5.7c zeigen die zeitliche Entwicklung des Verkehrsszenarios aus der Draufsicht. Der immersive Proband nimmt die in Abbildungen 5.7d bis 5.7f dargestellte virtuelle Ansicht der Simulation wahr, reagiert auf das herannahende Fahrzeug innerhalb der Erprobungsfläche, siehe Abbildungen 5.7g bis 5.7i. Die Wahrnehmung und Planung der HAD wird in den Abbildungen 5.7j bis 5.7l dargestellt. Schließlich zeigt Abbildung 5.7m das Verhalten der Verkehrsteilnehmer mit einer gesamt bewertenden Metrik auf, die mittels szenariospezifischen Space Time Cube analysiert werden kann, siehe Abbildungen 5.7n und 5.7o.

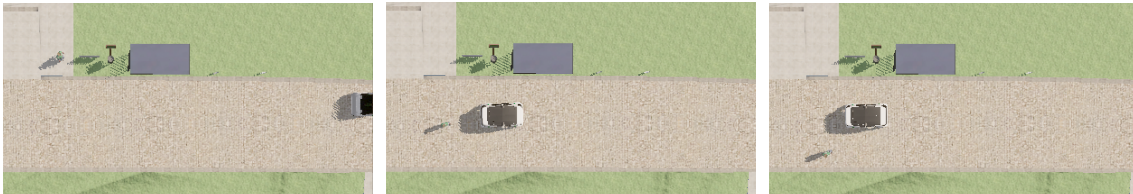
Das Shuttle beschleunigt ab  $t \approx 4$  Sekunden nach Aufzeichnungsbeginn seine Geschwindigkeit auf eine Zielgeschwindigkeit von knapp unter  $4 \text{ m/s}$ , welche ab  $t \approx 15$  Sekunden erreicht wird. Der immersive Proband bewegt sich dabei innerhalb der ersten 20 Sekunden immer wieder vor der Verdeckung der Haltestelle hin und wieder vor, um das Shuttle und dessen Position wahrzunehmen. Nach  $t \approx 29$  Sekunden startet der Fußgänger mit der Querung der Straße. Man erkennt anhand des Ausschlags der TTC um  $t \approx 32$  Sekunden, dass der Proband dabei zögert und die automatisierte Fahrfunktion für eine Notbremsung des Fahrzeugs um  $t \approx 31$  Sekunden sorgt. Nach erfolgreichem Queren nimmt das Shuttle wieder



## 5.4 Augmentierung von Verkehrsteilnehmern

Fahrt zur Erreichung seiner Zielgeschwindigkeit auf, verringert dann aber zeitig aufgrund einer anstehenden Kurvenfahrt die Geschwindigkeit (s. Abb. 5.7m).

Draufsicht auf das Verkehrsszenario.



- (a)  $t = 30.7s$ : Shuttle tritt in den Beobachtungsbe-  
reich (rechts) ein. (b)  $t = 35.9s$ : Shuttle stoppt  
rechtzeitig vor dem Fuß-  
gänger. (c)  $t = 38.0s$ : Shuttle fährt  
nach der Querung des  
Fußgängers wieder an.

Virtuelle Ansicht in der VR-Brille.



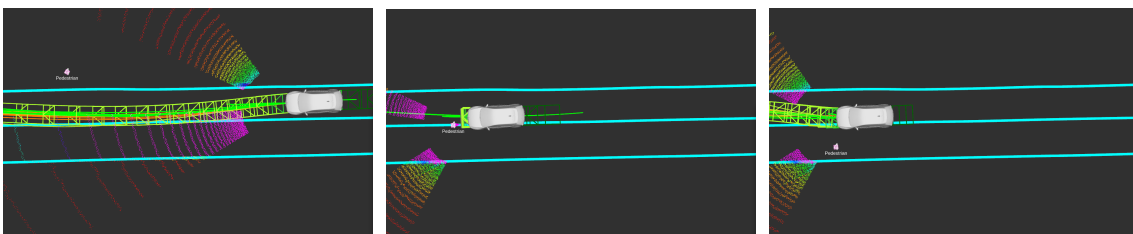
- (d)  $t = 30.7s$ : Fußgänger er-  
blickt nahendes Shuttle. (e)  $t = 35.9s$ : Fußgänger fo-  
kussiert auf Zielposition. (f)  $t = 38.0s$ : Fußgänger fo-  
kussiert auf Zielposition.

Verhalten des immersiven Probanden auf der Erprobungsfläche.

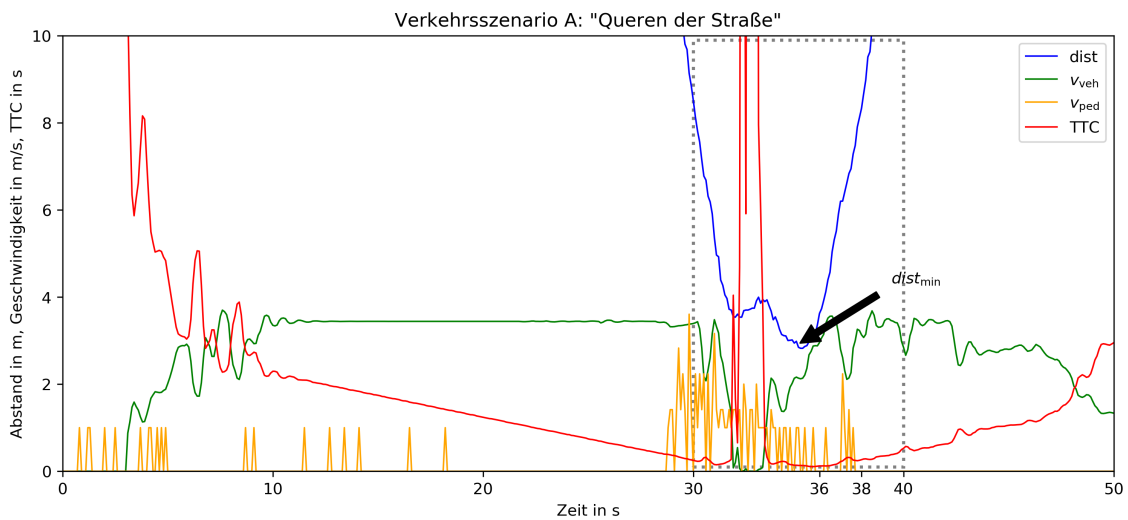


- (g)  $t = 30.7s$ : Proband blickt  
um virtuelle Haltestelle. (h)  $t = 35.9s$ : Proband läuft  
vor virtuelles Shuttle. (i)  $t = 38.0s$ : Proband been-  
det die Querung.

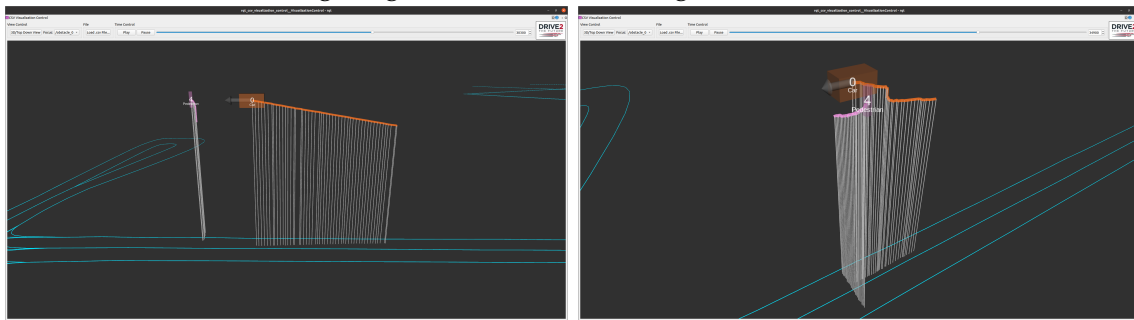
Umgebungswahrnehmung und Planung des HAD-Stacks.



- (j)  $t = 30.7s$ : Shuttle plant  
Trajektorie um erkanntes  
Hindernis. (k)  $t = 35.9s$ : Shuttle ver-  
kürzt Trajektorie zum  
Nothalt. (l)  $t = 38.0s$ : Nach dem  
Nothalt plant das Shuttle  
eine neue Trajektorie.



- (m) Analyse des Verhaltens der HAD gegenüber dem immersiven Fußgänger: Das Shuttle nimmt Geschwindigkeit auf, die Distanz zwischen Shuttle und Fußgänger verringert sich bis zum Zeitpunkt  $t \approx 35\text{s}$  und diese ihr Minimum mit ca. 3m zwischen Fußgänger und Mittelpunkt-Hinterachse des Shuttles annimmt. Bei einer Shuttle-Fahrzeuglänge von 2.7m ergibt sich ein Abstand von ca. 50cm. Der grau umrahmte Bereich stellt die obig dargestellte Szenarioabfolge dar.



- (n) Space Time Cube: Die Perspektive im 3D-Raum auf die x-z Ebene fokussiert auf die zeitliche Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhalten.
- (o) Space Time Cube: Die Rotation zeigt das Kreuzen vor dem Fahrzeug durch Adaption des Blickwinkels auf die Raum- und Zeitachse.

Abbildung 5.7: Analyse des Verkehrsszenarios A: Innerhalb der virtuellen Umgebung können kritische Szenarien, wie hier das knappe Queren der Straße, gefahrenlos getestet und analysiert werden. Das hier anhand einer HAD demonstrierten Verhalten gegenüber einem immersiven Fußgänger findet perspektivisch auf einem digital erweiterten Testfeld mittels Referenzmessensorik statt. Somit können von beiden Testteilnehmern Positionen, Geschwindigkeiten, sowie einer gesamtszenarienbeschreibenden Metrik, wie der hier exemplarisch verwendeten TTC, bemessen werden.

In **Verkehrsszenario B** soll der immersive Proband in seiner Rolle als Fußgänger die hochautomatisierte Fahrfunktion in ihren Schutzfunktionen bewusst mit Grenzverhalten herausfordern. Hierzu wird ein *Step-in-step-out* Manöver vorgegeben, bei dem der Fußgänger mehrmals aus einer Verdeckung hervor und damit vor das Fahrzeug tritt. Der Verlauf dieses Szenarios zwischen 35 s und 50 s wird in den Abbildungen 5.8a bis 5.8x aufgezeigt. Die Draufsicht in Abbildungen 5.8a bis 5.8f zeigt einen umfassenden Blick auf das Verkehrsszenario. Die Perspektive des Fußgängers in der VR-Brille ist im Verlauf der Abbildungen 5.8g bis 5.8l, sein Verhalten in Abbildungen 5.8m bis 5.8r dargestellt. Die Umweltinterpretation und Planung des HAD ist in Abbildungen 5.8s bis 5.8x dargestellt. Die Messungen werden in Abbildung 5.8y ausgewertet und mittels Space Time Cube in Abbildung 5.8z visualisiert.

In Darstellung 5.8y sind drei zeitliche Beobachtungsbereiche hervorgehoben, die das Verhalten des immersiven Fußgängers in seiner eigenständigen Trajektorienwahl auf das vorgegebene Manöver hin zeigt und die implizierten Auswirkungen auf das Verhalten der hochautomatisierten Fahrfunktion hervorhebt:

- I In der Simulationszeit um 38 s tritt der immersive Fußgänger aus der Verdeckung der Wartehalle auf die Fahrbahn und wird vom Shuttle wahrgenommen. Die Fahrfunktion verzögert und passt die bestehende, vorab geplante Trajektorie an, siehe Abbildung 5.8s. Nach einer kurzen Verzögerung tritt der Fußgänger wieder zurück, sodass das Shuttle wieder Geschwindigkeit aufnimmt.
- II In der Simulationszeit um ca. 41 – 43 s tritt der Fußgänger weiter vor das Fahrzeug, die Fahrfunktion verzögert und das Fahrzeug kommt mit entsprechendem Abstand vor dem Fußgänger zum Stehen, siehe Abbildungen 5.8c und 5.8s.
- III Schließlich tritt der Fußgänger nochmals vor das Fahrzeug, es kommt zu einer Beinahekollision. Dies triggert ebenfalls den PSO-Planer, der nun eine neue Neuinitialisierung zur Findung einer neuen Trajektorie anstößt, siehe Abbildung 5.8v.

Die Anwendung der datengetriebenen Immersion auf das Problem realistischer Interaktionen zwischen Fußgängern und automatisierter Fahrfunktion zeigt auf wie Szenarienbeschreibungen in Form von Manöurvorgaben schließlich in freie Trajektorienwahlen durch den immersiven Probanden münden. Norm- als auch Grenzverhalten können hier abgebildet werden, ohne Notwendigkeit der expliziten Modellbildung und ggf. deren Parametrierung. Vielmehr ergibt sich durch diese Anwendung die Möglichkeit, den sogenannten „*long tail of validation*“ bewusst anzugehen, siehe auch Kapitel 3.1. Es können damit kritische Fälle bezogen auf Verhaltensaspekte erzeugt werden, die in Realität bei der Flottenerprobung kaum stell- oder erfassbar sind, gleichzeitig aber in verschiedenen Variationen so erprobt werden können. Dieser Ansatz bietet somit auch einen wertvollen Beitrag zur Validierung von hochautomatisierten Fahrfunktionen im Kontext der Prüfgebiete und Testfelder.

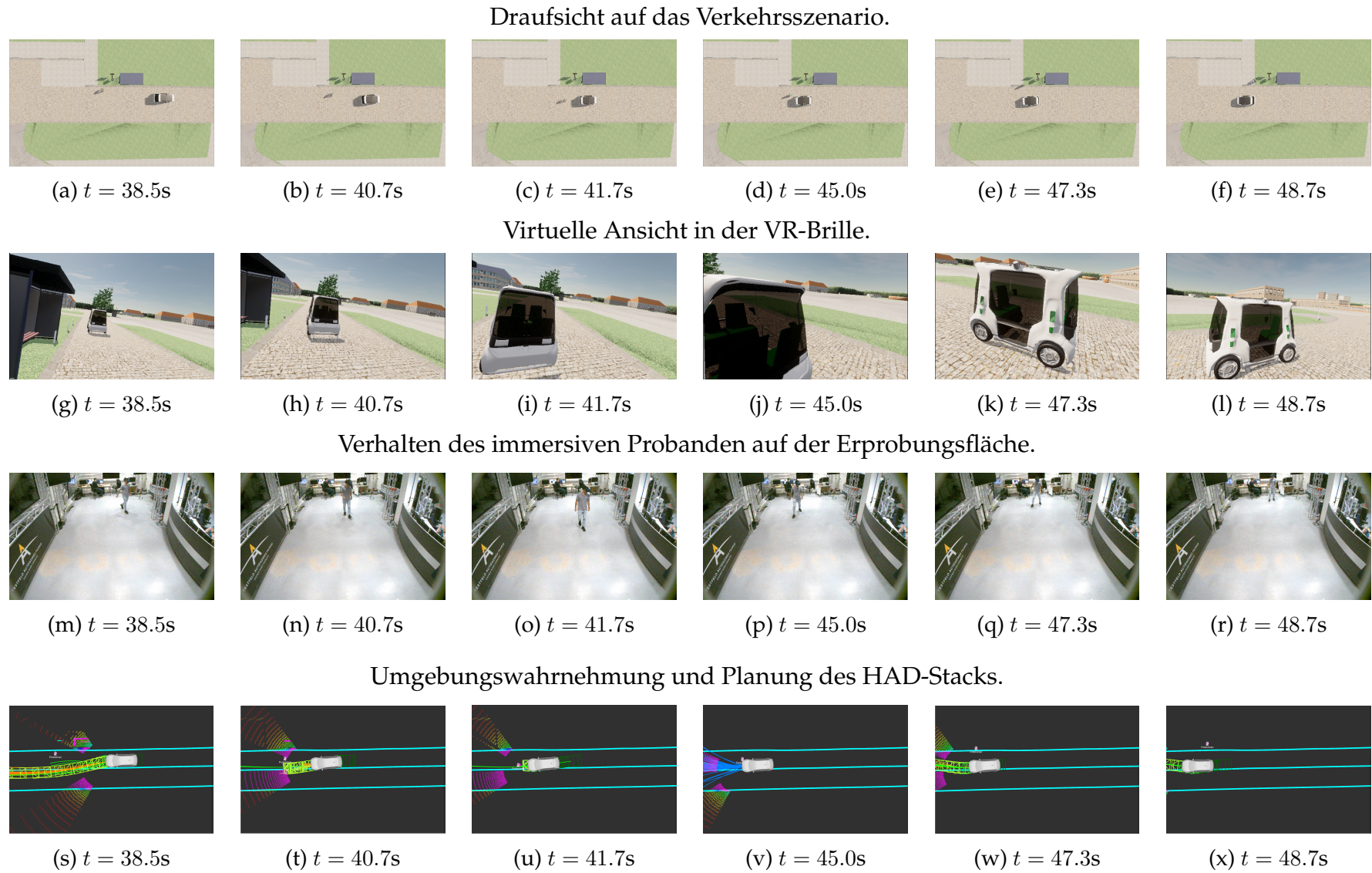
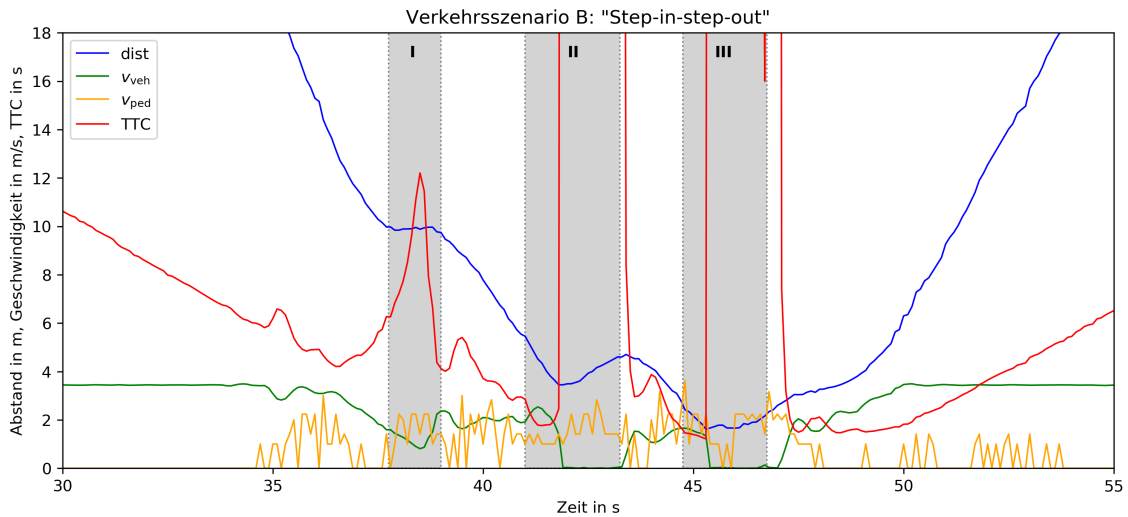


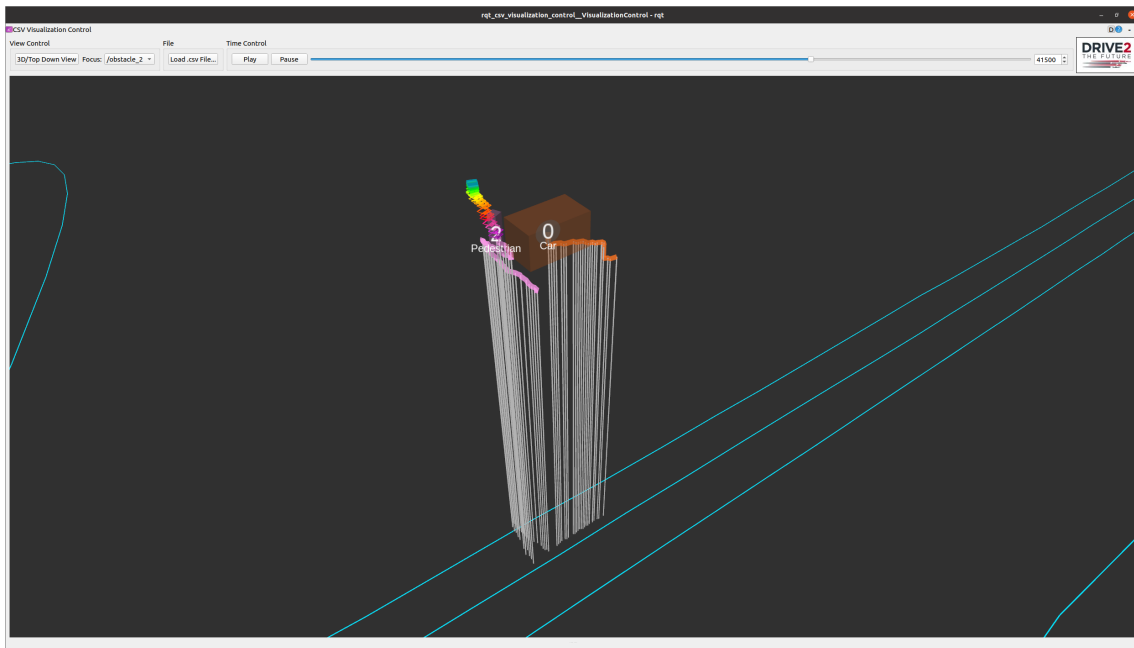
Abbildung 5.8: Analyse des Verkehrsszenarios B: Exposition des *Step-in-step-out* Manövers ggü. der hochautomatisierten Fahrfunktion.



## 5.4 Augmentierung von Verkehrsteilnehmern



- (y) Der immersive Proband tritt als Fußgänger immer wieder aus dem Sichtschatten der Haltestelle hervor und erlaubt somit das Verhalten der Fahrfunktion in verschiedenen Abständen mit verschiedenen Dynamiken herauszufordern. Die Analyse der TTC erlaubt dabei die Kritikalität der jeweiligen, durch die Interaktionen resultierenden Szenen zu bewerten.

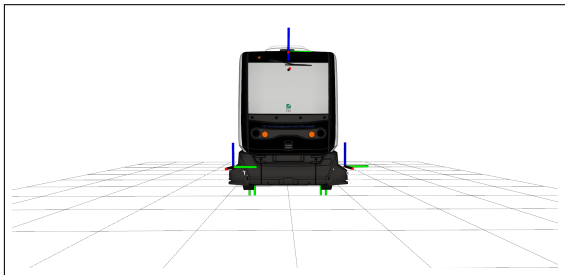


- (z) Interaktive Analyse mittels Visual Analytics und Darstellung der Interaktion im Ort-Zeit-Raum. Space Time Cube zeigt die Interaktion zum Simulationszeitpunkt  $t = 46.1s$  (entspricht angegebener Datenzeit 41.5s).

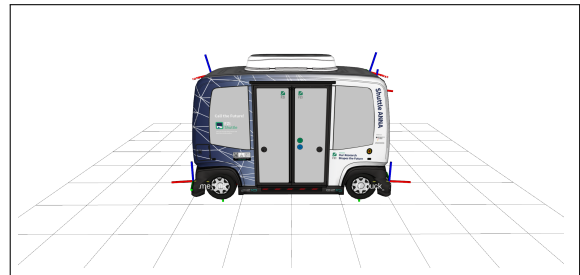
Abbildung 5.8: Auswertung des Verkehrsszenarios B: Step-in-step-out als definiertes Grenzverhalten.

## 5.5 Exposition und Injektion in automatisierte Fahrfunktionen

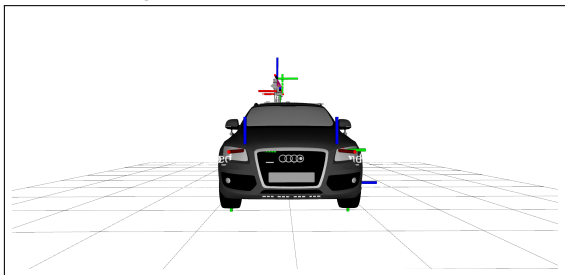
Um die realen Gegebenheiten mit virtuellen Abbildern der Umgebung über die Injektionsschnittstellen zu augmentieren, werden digitale Abbilder der Fahrzeuge mit der Möglichkeit der Aufnahme der externen Positionierung und virtuellen Sensordatenausgabe benötigt. Dabei kommen insbesondere vorgestellten Konzepte der Avatare zum Einsatz. Zum Zweck der Evaluation auf Sensordatenebene kommen die FZI Versuchsträger Cognitive Car (CoCar) und ELLA zum Einsatz. Diese wurden entsprechend auf Modelle zur Integration in die Simulation Gazebo Sim abgebildet, siehe Abb. 5.9.



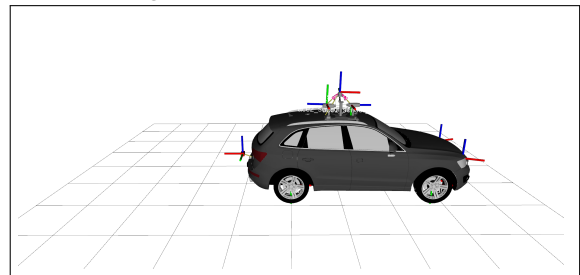
(a) Vorderansicht des digitalen Shuttle-Zwillings.



(b) Seitenansicht des digitalen Shuttle-Zwillings.



(c) Vorderansicht des digitalen CoCar-Zwillings.



(d) Seitenansicht des digitalen CoCar-Zwillings.

Abbildung 5.9: Geometrische Modellierung der Versuchsträger Shuttle ELLA und CoCar mittels URDF.

Avatarmodelle besitzen keine eigene kinematische Modellierung ihrer Bewegung im Raum, sondern erhalten ihre Bewegungsinformation von einem externen Referenzmesssystem. Vielmehr handelt es sich um eine geometrische Modellierung mit Bezug zu den abzubildenden Sensormodellen und deren Verbaupositionen. Die Messwerte der abzubildenden, exterozeptiven Sensoren werden dabei in Bezug zum Sensorkoordinatensystem erfasst. Der Bezug dieses Koordinatensystems erfolgt zum fahrzeugeigenen Bezugssystem, dem BASELINK. Diese Relationen wurden in der vorliegenden Arbeit aufgrund technischer Spezifikationen in den Modellierungssprachen Unified Robot Description Format (URDF) innerhalb ROS und Simulation Description Format (SDF) [277] in Gazebo Sim modelliert.

Die Modellierung fand dabei in diesen XML-basierten Beschreibungssprachen mittels Gliedern (engl.: „links“) und Gelenken (engl.: „joints“) statt.

Neben der geometrischen Modellierung wird eine entsprechende Abbildung der Sensorwirkweise in Form eines Sensormodells, die entsprechende Parametrierung dieses Modells, sowie eine Abbildung der Grundwahrheit im Sensordatenraum benötigt, die die abgebildeten Objekte und deren Eigenschaften repräsentiert. Die Parametrierung der Sensormodelle wurde entsprechend der Kalibrierung an den realen Fahrzeugen vorgenommen. Die intrinsischen Parameter der Frontkamera des Shuttle wurden dabei algorithmisch bestimmt, siehe Tabelle 5.1. Verzerrungen durch Linsen wurden gemessen, allerdings lediglich für die Entzerrung und Rektifizierung der realen Kamerabilder angewendet. Da auf eine Augmentierung auf entzerrten und bereits rektifizierten Kameraaufnahmen abgezielt wird, ist eine Abbildung von linsenspezifischen Effekten, wie Kissen- oder Tonneneffekten, nicht notwendig. Für die externe Kalibriermatrix  $V$  wurde der translatorische Anteil der Sensoraufhängung manuell vermessen und der rotatorische Anteil über Reprojektion iterativ und manuell optimiert.

Parameter	Beschreibung	Wert und Einheit
$h$	Bildbreite	1920px
$w$	Bildhöhe	1200px
$f_x$	horizontale Brennweite	1770.37mm
$f_y$	vertikale Brennweite	1776.09mm
$c_x$	horizontaler Bildhauptpunkt	979.57px
$c_y$	vertikaler Bildhauptpunkt	593.76px
$t$	Externe Translation	(1.6, 0.0, 2.15)m
$R$	Roll-, Nick- und Gierwinkel	(0.00, 120.05)rad

Tabelle 5.1: Intrinsische und extrinsische Kameraparameter von ELLA.

Der Aufnahmepunkt der Lokalisation BASELINK, die über ein entsprechendes Referenzmesssystem gemessen und dann zu einem definierten, testfeld- oder prüfgelände-referenzierten Nullpunkt bezogen wird, ist fahrzeugspezifisch gelöst: Im Shuttle ELLA befindet sich dieser Aufnahmepunkt auf dem Mittelpunkt aller Radaufsatzpunkte, wohingegen dieser in CoCar durch den Mittelpunkt der Hinterachse definiert ist. Die über die virtuellen Sensoren gelieferten Sensordaten werden über ROS-Nachrichten entweder der Aufzeichnungskomponente oder direkt der Laufzeitumgebung zur Verfügung gestellt. Entsprechende Proxy-Funktionskomponenten nehmen diese über geschaffene Injektionsschnittstellen für die Augmentierung mit den realen Sensordaten entgegen.

### 5.5.1 Relative Selbstlokalisierung in Parkhausinnenräumen

AVP-Funktionen basieren im Allgemeinen auf relativen Selbstlokalisierungsfunktionen, um sich in Parkinnenräumen oder engen Häuserschluchten orientieren zu können. Zum Aufbau einer Karte werden prägnante Umgebungsmerkmale sensoruell erfasst und identifiziert, an denen sich das Fahrzeug zur Laufzeit dann orientiert, um auf die aktuelle Pose rückschließen zu können. Diese Systeme sind

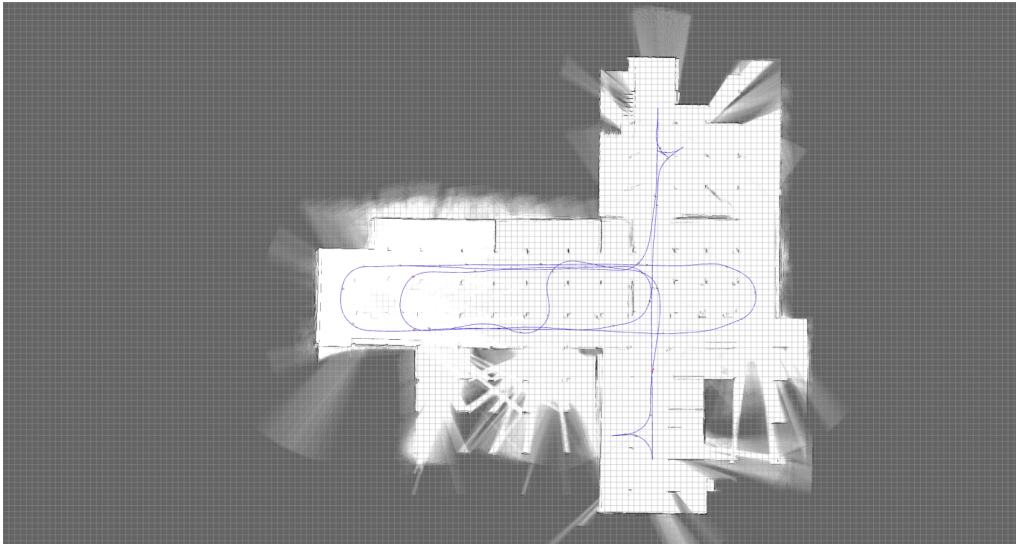
daher wesentlich von der momentanen und potentiell durch Verdeckungen eingeschränkten Sicht abhängig. Im Folgenden wird die Anwendung der vorliegenden Methodik zur Bewertung einer auf dem Google Cartographer [278] basierenden Lokalisierungsfunktion mittels Augmentierung auf digital erweiterten Prüfgeländen und Testfeldern aufgezeigt, siehe auch [Zofka et al., 2018a].

Dazu wurde für das Parkhaus Rintheimer Straße in Karlsruhe ein digitales Abbild erzeugt. Hierzu wurde eine erfasste Punktwolke in ein Gitternetz überführt und als CAD-Modell mit weiteren Elementen (Pfosten,...) ausgestattet. Die Kartierung wurde dabei innerhalb des Parkhauses durchgeführt. Die online durchgeführte Lokalisierungsphase wird nun auf dem mit dem Parkhaus augmentierten Prüfgelände durchgeführt, siehe Abbildung 5.10. Dies entspricht somit dem vorgestellten **Scenario-to-Go** Vorgehen.

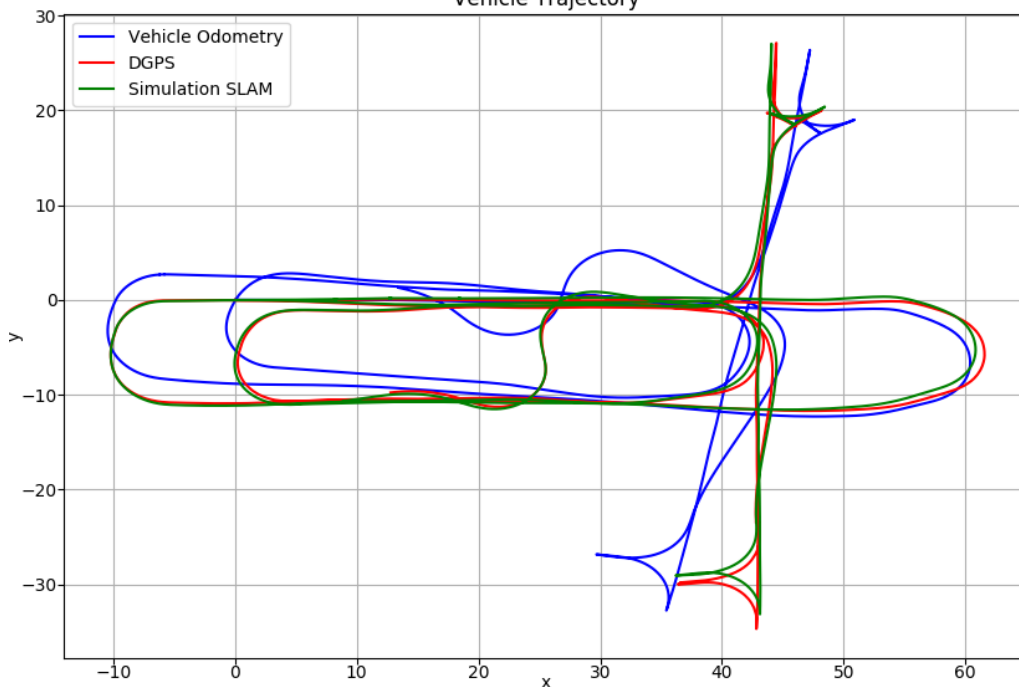
Abbildung 5.10a zeigt die Steueroberfläche des Testsystems mit der Darstellung der Bewegung im simulierten Umgebungsmodell, auf dessen Basis die Sensormodelle in Gazebo Sim agieren. Dabei orientiert sich das Fahrzeug über die augmentierten Laserscans innerhalb der a priori erzeugten SLAM-Karte, siehe Abbildung 5.10b. Die Diskrepanz zwischen der Fahrzeugodometrie (engl.: „*vehicle odometry*“), der relativen Selbstlokalisierung in dem augmentierten Parkhaus (engl.: „*simulation slam*“), und dem Referenzmesswert des auf dem Prüfgelände zur Verfügung stehenden DGPS werden offensichtlich, siehe Abbildung 5.10c.



(a) Funktionsweise: Die reale Position des Versuchsträgers wird in den Avatar innerhalb des digitalen Abbilds gespeist und die virtuellen Sensordaten werden in das Steuergerät im Versuchsträger injiziert. Ausschnitt aus Originaldarstellung [Zofka et al., 2018a].



(b) Gefahrene Trajektorie auf einer SLAM-Karte.  
Vehicle Trajectory



(c) Gegenüberstellung der rel. Selbstlokalisierung in augmentiertem Szenario mit realer Fahrzeugodometrie und Referenzmesssystem DGPS.

Abbildung 5.10: Auswertung der Lokalisierung durch Augmentierung einer statischen Parkhaus-Szenerie mittels Lidar-Laserscan-Injektion in die Verarbeitungseinheit. Aus [Zofka et al., 2018a], © 2018 IEEE.

Im vorliegenden Experiment wurde das Verkehrsszenario konstant gehalten. Dieser Ansatz erlaubt nun weitergehende Evaluationen zur Validierung der hochautomatisierten Selbstlokalisierungsfunktion mit zusätzlichen funktionalen Blöcken unter Berücksichtigung vorausfahrender oder folgender Fahrzeuge, sowie parkenden Fahrzeugen und verschiedenen Fußgängergruppen und -verhalten.

### 5.5.2 Detektion von Verkehrsteilnehmenden

Im Folgenden wird die kamerabasierte Augmentierung mittels aufgezeichneter Sensordatenströme der beiden FZI Versuchsträger CoCar und ELLA analysiert. Eine Bewertung der Klassifikationsergebnisse der zwei verwendeten Klassifikatoren mittels Gütemaßen, wie der True Positive oder False Negative Rate, erscheint dabei als nicht sinnvoll, da diese vielmehr bei der Bewertung und dem Vergleich von ML-basierten Klassifikatoren zum Einsatz kommen. Im Fokus steht daher die klassifikatorunabhängige Anwendung der vorgestellten Augmentierungsmethodik.

Die auf Kamerasensordaten basierende Augmentierung von Verkehrsteilnehmenden wurde in der ursprünglichen Veröffentlichung [Zofka et al., 2014b] auf Basis von Autobahnaufzeichnungen durchgeführt. Als beispielhafte Assistenzfunktion wurde hier auf einen Haar-Wavelet basierenden Klassifikator zurückgegriffen, der auf den beiden Klassen von Fahrzeugvorder- und -rückansicht mittels Realdaten eintrainiert wurde. Die Augmentierung fand dabei auf mit Messreihen von Kamera- und GNSS/INS-Daten, die mit dem Versuchsträger CoCar eingefahren wurden, in Verbindung mit virtuellen Sensordaten aus dem im IPG CarMaker verfügbaren Kamerasensormodell statt.

Als zu erzeugendes, für das Ego-Fahrzeug kritisches Szenario, wurden ein Fahrstreifenwechsel und ein dadurch ausgelöstes kritisches Auffahrszenario auf einer Autobahn gewählt. Dieses Szenario wird über die beiden in der Simulation modellierten und dann simulierten Fahrzeuge (rotes und graues Fahrzeug) erzeugt. Abbildung 5.12a stellt die Klassifikation des realen, weißen Transporters auf der gegenüberliegenden Fahrbahn, wie auch den aus der Simulation injizierten grauen Fahrzeugs auf dem linken Fahrstreifen dar. In Abbildung 5.12b führt das rote Fahrzeug den Bremsvorgang durch, worauf nun das graue Fahrzeug auf den mittleren Fahrstreifen ausweicht, siehe Abbildung 5.12c, und für das Ego-Fahrzeug ein kritisches Szenario erzeugt. Beide werden von der Assistenzfunktion erkannt. Schließlich fährt das Ego-Fahrzeug auf das graue Fahrzeug auf, siehe Abbildung 5.12d, was die nachgelagerte Entscheidungsfunktion des automatisierten Systems veranlassen soll. Schließlich ist in Abbildung 5.12d eine Missklassifikation ersichtlich.

Aufgrund des Haar-Wavelet-basierten Ansatzes wurden Auswirkungen durch eine zusätzliche Kantenglättung mittels Anti-Aliasing untersucht, siehe Abbildungen 5.11a und 5.11b. Dabei wurde festgestellt, dass Anti-Aliasing die Erkennbarkeit von weiter entfernten Fahrzeugen, die sich in weniger Pixelfläche manifestieren, verbessert. Desweiteren wurde festgestellt, dass der Klassifikator wesentlich auf zusätzliche Schattenebenen, die zum 3D-Modell des Fahrzeugs statisch modelliert wurden, reagiert und einen positiven Einfluss auf die Erkennbarkeit der Fahrzeuge hat, siehe Abbildungen 5.11c und 5.11d. Somit kann ein Rückschluss auf potentielle Einflüsse der Trainingsdatenmenge des Klassifikators gezogen werden. Schließlich kommt in der verwendeten Simulationsumge-



bung ein Shader-basiertes Rendering zum Einsatz. Es wird somit kein photorealistisches Rendering der synthetischen Kameraansichten benötigt.

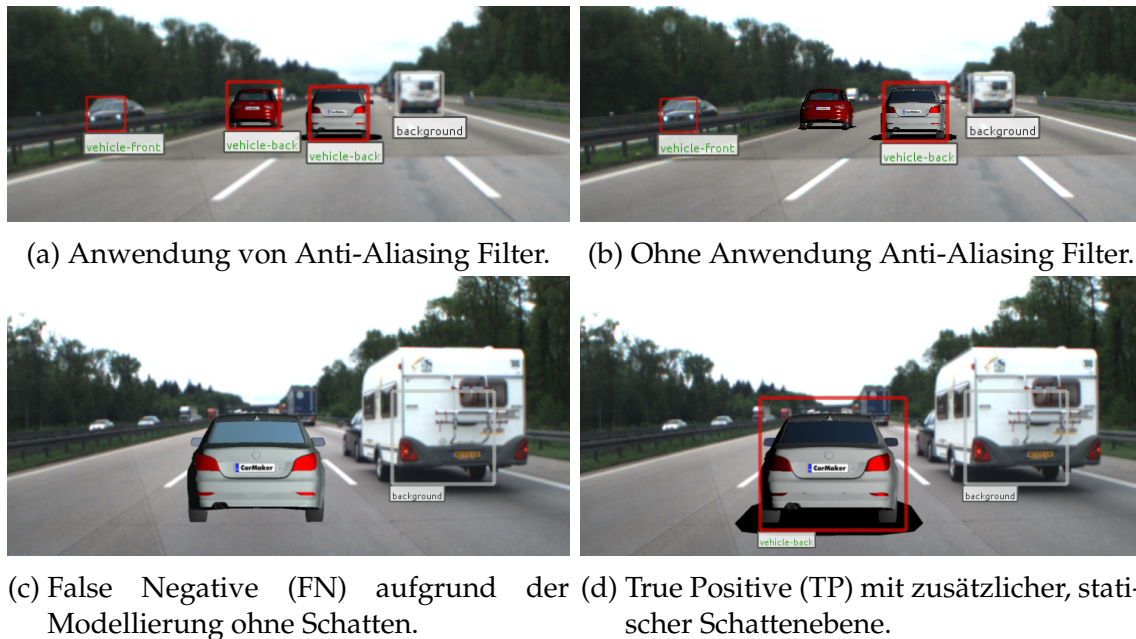
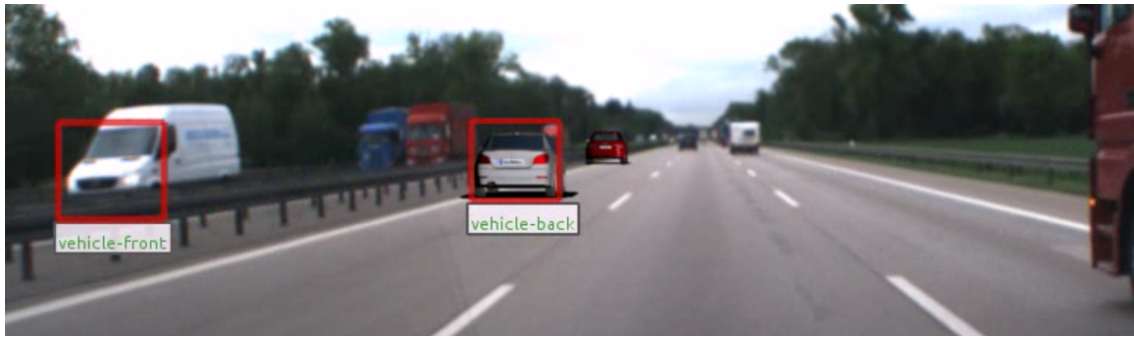


Abbildung 5.11: Auswirkungen von Kantenglättung und Modellierung zusätzlichen Schlagschattens auf die Erkennung von Fahrzeugen. Bildquelle: [Zofka et al., 2014b], © 2014 IEEE.

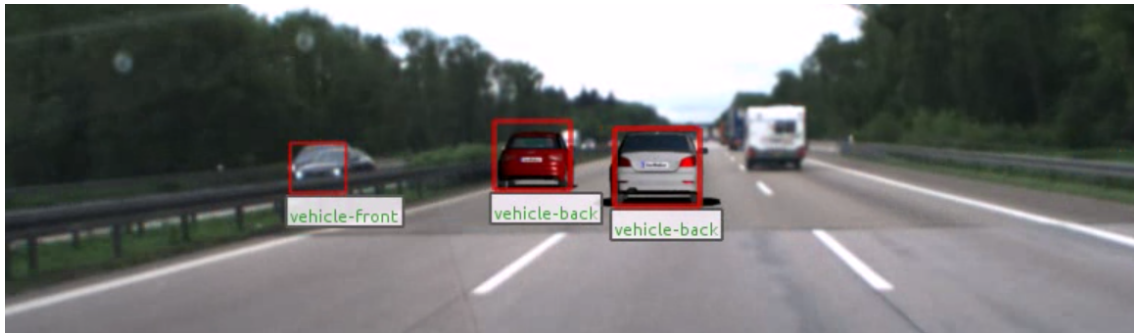
Das Prinzip der kamerabasierten Augmentierung wurde ebenfalls auf die Simulationsumgebung Gazebo Sim [189] mit dem automatisierten Shuttle ELLA adaptiert. Als exemplarische Komponente wurde hierzu der Open Source verfügbare Klassifikator FCOS3D [279] verwendet. Es handelt sich hierbei um eine monokulare 3D-Objekterkennung, die ohne eine dedizierte 2D-Erkennung oder eine 2D-3D Korrespondenzannahme auskommt. Dieses Modell agiert auf Faltungsschichten (engl.: „*fully convolutional*“) und führt eine Detektion und Klassifikation in einem Schritt (engl.: „*one stage*“) aus. Es werden zahlreiche Verkehrsobjektklassen erkannt, von denen folgend auf Fußgänger, Fahrräder und Fahrzeuge fokussiert wird.

Hierfür wurde auf dem Rundkurs des Erprobungsgeländes ein Szenario der Personenbeförderung auf der letzten Meile erstellt. Wie bereits beschrieben, wurden Haltestellen, parkende Fahrzeuge, sowie statische und bewegende Fußgänger augmentiert. Abbildung 5.13 zeigt die Detektionen des FCOS3D-Klassifikators an den verschiedenen augmentierten Örtlichkeiten des Szenarios der letzten Meile. Dieser Transfer durch Einsatz eines gänzlich unterschiedlichen Straßen- und Geschwindigkeitsbereichs, eines weiteren Fahrzeugs (somit einer anderen ODD) und einer weiteren Simulationsumgebung eröffnet weitere Erkenntnisse hinsichtlich der Einflüsse durch Modellfehler, die sich in Diskrepanzen zwischen der realen Welt und dem digitalen Abbild niederschlagen, siehe auch Abbildung 5.14.

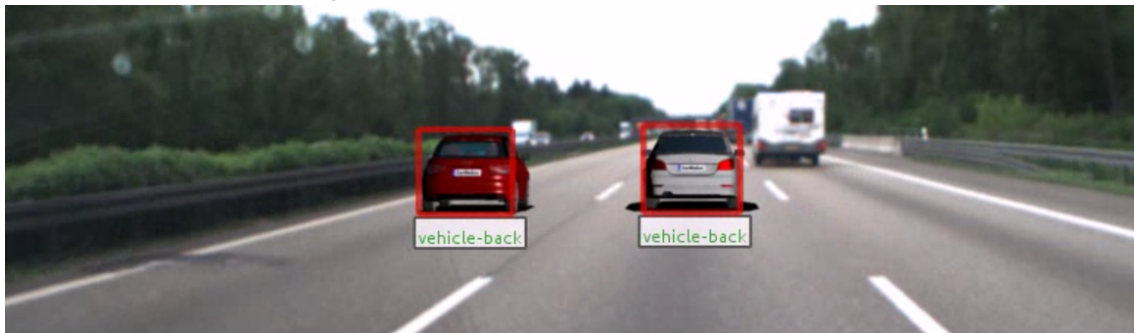
Verschiedene Erkenntnisse hinsichtlich der Modellierung, beziehungsweise der



(a) Auf dem linken Fahrstreifen folgt das graue einem vorausfahrenden roten Fahrzeug.



(b) Der rote PKW auf dem linken Fahrstreifen führt eine Notbremsung durch, sodass der auffahrende PKW reagiert.



(c) Der rote PKW verzögert und der graue PKW beendet den Einschervorgang.



(d) Schließlich fährt das Ego-Fahrzeug auf den grauen PKW auf. ADAS oder HAD können dann eine Kollisionsvermeidung einleiten. Während das reale Fahrzeug korrekt klassifiziert wird, findet für den Camper eine Missklassifikation statt.

Abbildung 5.12: Augmentierung hin zu einer kritischen Auffahrsituation auf einer Autobahn. Veröffentlicht in [Zofka et al., 2014b], © 2014 IEEE.





(a) Ego-Shuttle nähert sich der ersten Haltestelle. Die Verdeckung des realen Fahrzeugs durch den virtuellen Bus ist aufgrund fehlender Referenzmesstechnik nicht auflösbar.



(b) Virtuelles Fahrrad, virtueller Fußgänger und reales Fahrzeug werden erkannt, trotz durch nicht-modellierte Transparenz und Segmentierungskamera induzierten Modellfehler.



(c) Positionierung der virtuellen Haltestelle mit Passant beim Einlenken des Shuttles auf gerade Fahrbahn.



(d) Positionierung der virtuellen Haltestelle mit Passant beim Auffahren des Shuttles auf gerader Fahrbahn.



(e) Vordere, virtuelle Haltestelle mit straßenseitiger Verdeckung des virtuellen Fahrzeugs durch das reale Fahrzeug.

Abbildung 5.13: Der Rundkurs des Testfeldes wird mit statischen und dynamischen Verkehrsteilnehmenden augmentiert, um als Erprobungsfläche für die letzte Meile Beförderung zu dienen. Darstellung der FCOS3D-Detektionen auf den augmentierten Kameradaten.

entsprechenden Modellierungs- und Simulationsfähigkeiten der genutzten Simulation, zeigen sich innerhalb der Analyse auf:

- Die Grundwahrheitswerte werden innerhalb von Gazebo Sim mittels einer panoptischen Segmentierungskamera erzeugt. Diese erlaubt einerseits keine Abbildung von Grundwahrheitswerte der Pixel bei Gelenkwinkelbewegungen der genutzten Fußgängermodelle und andererseits von (teil-) transparenten Materialien. Dies ist bei Fußgänger #110 und der Haltestelle in Abbildung 5.13b ersichtlich. Dies kann durch verbesserte Modellierungen in Form von Sensormodellen vermieden werden.
- Nicht vorhandene Tiefeninformation in den zur Augmentierung als Basis der realen Sensordaten: Nicht vorhandene Grundwahrheitsinformationen über die Tiefe zu realen Objekten, siehe Verdeckung des realen Fahrzeugs durch den virtuellen Bus in Abbildung 5.13a, führt zu inkonsistenten Szenenkonfigurationen. Im folgenden Kapitel wird erläutert, wie diesem Nachteil durch Einführung einer Referenzmesssensorik mit entsprechender Kommunikationsfähigkeit der Grundwahrheit entgegen gewirkt werden kann.
- Schließlich führt eine zu grobe Sensorkalibrierung der intrinsischen Sensorparameter oder externen, geometrischen Aufhängung am Fahrzeug, zu einer ungenauen Abbildung in die Simulation und mit zu einer ungenauen Augmentierung mit den realen Sensordaten.



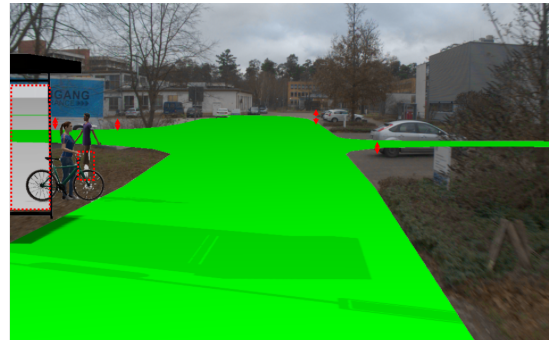
- Eine zu niedrige Frequenz der eingehenden Lokalisierung im Vergleich zur Sensor- und damit Augmentierungsfrequenz: Am vorliegenden Beispiel steht die (über SLAM zur Verfügung gestellte) Lokalisierungsinformation mit 10 Hz wesentlich niedrigerfrequent als die mit 20 Hz erfassten und augmentierten Kamerabilder zur Verfügung.

Weiterhin führen Fehlannahmen hinsichtlich der Straßenfläche, wie die Annahme einer planaren Welt in dem Geländemodell, zu einer wesentlichen Diskrepanz zwischen der Realität und dem digitalen Zwilling. Dies wird verstärkt durch eine reine Übernahme der Position des realen Versuchsträgers ohne Berücksichtigung von Roll- oder Nickwinkel. Dies gilt, wenn der reale Versuchsträger physikalische Stimuli erfährt, die nicht bemessen werden und in die Positionierung innerhalb der Simulation übertragen werden. Diese sind im Sensorbild, allerdings nicht in der Positionierung des Avatars und daher nicht in den virtuellen Sensordaten ersichtlich, siehe Abbildung 5.14. Dies gilt für das Versuchsgelände in Form von unebenen Fahrbahnbelag, wie Kopfsteinpflaster, oder auch durch Kurvenfahrt und hohen Fahrzeugschwerpunkt herbeigeführte Auslenkungen.

Der Beitrag der verschiedenen, sich gegenseitig verstärkenden Modellfehler von Diskrepanzen im digitalen Geländemodell, über ungenügenden Kalibrierparametern, ungenauer Positionierungsübergaben und -latenzen bis hin zur Abbildung und Sensorerfassung in der Simulation müssen in aufbauenden Arbeiten<sup>1</sup> untersucht werden.



(a) Modellfehler durch Straßenmodell und Positionierungsübergabe. Pfeile und gestricheltes Dreieck zeigen lateralen Versatz der hinter Containern liegenden Straßenführung auf.



(b) Reprojektion des digitalen Straßenmodells zeigt örtlich abweichende Fehler (rote Pfeile) der realen Straßenführung zu in Kamerabild abgebildete Straßenführung auf.

Abbildung 5.14: Reprojektion des Straßenmodells (Lanelet) in reale Kameradaten: Modellfehler entlang der Datenverarbeitungskette der Augmentierung verstärken sich und führen zu Fehlern in der Augmentierung von realen und virtuellen Kamerasensordaten. Fehlende Tiefeninformation, fehlende Grundwahrheit und nicht modellierte Aspekte (LSA) stellen weitere Modellfehler dar.

<sup>1</sup>Siehe auch Ausblick in Kapitel 6.2.

## 5.6 Verteiltes Testsystem

Die vorhergehende Betrachtung der augmentierten Sensordaten zeigt auf: Durch die Unkenntnis der auf Testfeld oder Prüfgelände vorliegenden realen Verkehrsobjekte, erscheinen virtuell augmentierte Verkehrsobjekte immer zwischen realen Objekten sowie dem Mess-, beziehungsweise Erprobungsfahrzeug. Dem Umstand kann durch Anwendung intelligenter und vernetzter Infrastruktur entgegengewirkt werden, die die realen Verkehrsteilnehmer und -hindernisse erfasst und in den digitalen Zwilling abbildet. Hierzu wird eine Kommunikation zwischen der infrastruktur- und dem fahrzeugseitigen Testsystem benötigt. Diese eröffnet die Möglichkeit eines verteilten Simulations- und Testsystems.

Zur Evaluation wird ein empirischer Ansatz verfolgt. Die Machbarkeit wird daher innerhalb eines funktionalen Tests mit einem Demonstrator nachgewiesen und Erkenntnisse diskutiert. Die erstmalige Umsetzung und Evaluation innerhalb eines AVP-Parkszenarios mit dem Versuchsträger CoCar in [Zofka et al., 2023] wurde für die vorliegende Schrift auf den Versuchsträger CC-NG zur Bewältigung einer urbanen Kreuzungssituation auf dem Prüfgelände adaptiert. Die Evaluation zur Bewertung der Umsetzung mittels IEEE 802.11p und ETSI ITS-G5 stützt sich auf den Entwurf eines möglichst leichtgewichtigen Datenpakets für Austausch zwischen dem infrastruktur- und dem fahrzeugseitigen Testsystem, sowie auf die Qualität des Dienstes beschreibende Metriken, der Paketumlaufzeit (engl.: „round trip time“) als Indikator für die zeitliche Verzögerung und die Ausfallrate der Nachrichten.

Die maximale Größe eines Nachrichtenpakets (MTU) zwischen Geonetworking-Schicht und Zugriffsschicht (engl.: „access layer“) ergibt sich gemäß der ETSI Norm ETSI EN 302 636-4-1 [56] zu 1398 Bytes. Da dasselbe Datenpaket zwischen fahrzeug- und infrastrukturseitiger Testsystemkomponente ausgetauscht wird und – aufgrund der Übermittlung virtueller und weiterer realer Fahrzeuge – zwischen Infrastruktur und Fahrzeug maximal wird, lässt dies eine Abschätzung des Kommunikationsaufwands zu. Es ergibt sich für die zwischen beiden Teilnehmern zu kommunizierende Nachrichtengröße  $s(m)$  in Abhängigkeit von  $m$  virtuellen Fahrzeugen:

$$s(m) = \underbrace{26 \text{ Byte}}_{\text{Header}} + \underbrace{6 \text{ Byte}}_{\text{Scenario Container}} + \underbrace{57 \text{ Byte}}_{\text{SuT Container}} + \underbrace{57 \text{ Byte} \cdot m}_{\text{Testsystem Container}} \quad (5.1)$$

Für einen realen Versuchsträger mit einem weiteren virtuellen Fahrzeug ergibt sich mit  $s_{\min} = 144$  Bytes die minimale Nachrichtengröße einer Testsystemnachricht. Die größtmögliche Testsystemnachricht ergibt sich wie folgt:

$$\arg \max_m s(m) = \{m \mid s(m) = \max_s s(m) \wedge s(m) \leq 1398 \text{ Bytes}\} \quad (5.2)$$

Die maximale Nutzung ergibt sich nach dem aktuellen Modell für  $m = 23$  weitere virtuelle Verkehrsteilnehmer oder Hindernisse mit einer resultierenden Nachrichtenmaximalgröße von  $s_{\max} = 1398$  Bytes. Neben der theoretischen Betrachtung

tung wurde in diversen Versuchsfahrten die reale Größe des Datenpakets bemessen. Bei Versuchsfahrten mit  $3 \leq m \leq 8$  zusätzlichen, virtuellen Verkehrsteilnehmern rangiert die Gesamtpaketgröße zwischen 500 und 1100 Byte. Dies wird auf die Datenkodierung und Serialisierung mit der Bibliothek Boost [280] zurückgeführt.

Für die Kommunikation zwischen der OBU eines Versuchsträgers und einer RSU als direkte Testsystemkomponenten lässt sich die theoretische Kanalauslastung  $l$  in [%] aus der Übertragungsrate  $t$  in Hz, der Nachrichtengröße  $k$  in Byte und Netzwerknoten  $n$  wie folgt abschätzen<sup>2</sup>:

$$l = \frac{t \cdot k \cdot f}{r} \quad (5.3)$$

$$= \frac{2 \cdot s(m) \cdot f}{6 \text{ Mbit/s}} \quad (5.4)$$

Für die Datenrate des aktuellen ETSI ITS-G5 Standards [282]  $r = 6 \text{ Mbit/s}$ , und angenommenen  $m = 10$  Verkehrsteilnehmer, erhält man für eine Sendefrequenz von  $f_l = 25 \text{ Hz}$  eine Auslastung von  $\approx 4\%$ , wobei bei einer deutlich erhöhten Sendefrequenz von  $f_h = 100 \text{ Hz}$  eine Auslastung von  $\approx 18\%$  erreicht wird. Dieser durch die Testsystemnachrichten induzierte Kommunikationsaufwand kommt allerdings zur Grundlast durch die Kommunikation von CAM und Beacons zwischen den Netzwerknoten hinzu. Bei zwei angenommenen Kommunikationsteilnehmern ergibt sich theoretisch somit eine ausreichende Kapazität zur Übermittlung von zusätzlichen Verkehrsteilnehmern und -hindernissen.

Die Umsetzung fand auf der mit smarterer Infrastruktur versehenen Kreuzung des Erprobungsgeländes des TAF-BW statt, wobei handelsübliche OBU und RSU, siehe Abbildung 5.2c, zum Einsatz kamen. Diese erlauben über eine entsprechende Schnittstelle die Übergabe von Nachrichtenpaketen der Geonetworking- an die Zugriffsschicht sowie dessen Empfang. Als Szenario wurde eine Belegung der Kreuzung mit virtuellen, modellbasierten Fahrzeugen zur manuellen Befahrung mit dem Versuchsträger CC-NG simuliert. Der folgende Nachweis steht damit auch für statische oder durch Verkehrsinfrastruktur beobachtete Verkehrsteilnehmer, deren Zustände an den Versuchsträger mit der zu testenden Fahrfunktion übertragen werden. Hierzu wurde mit einem probabilistischen Modell ein Verkehrsfluss in SUMO modelliert, wobei jedes Fahrzeug als einzelner Agent repräsentiert wurde. Deren Verhalten wird kontinuierlich durch die Simulation zeitlich fortgeschrieben und an den auf dem Prüfgelände befindlichen Versuchsträger kommuniziert.

An dem Knotenpunkt soll im Zusammenspiel zwischen realen und virtuellen Verkehrsteilnehmern Rechts-vor-Links Situationen bewältigt werden. Entsprechend wurde die Funktion der realen LSA für das Experiment deaktiviert, sodass daher und aufgrund fehlender Straßenschilder gemäß StVO Rechts-vor-Links

<sup>2</sup>Diese Approximation gilt nur für zwei Netzwerknoten, da es sich um ein AdHoc peer-to-peer Netzwerk [281] handelt.

gilt. Der Versuchsträger bewegt sich von dem Check-In Bereich auf die Kreuzung zu und hält. Die aus derselben Richtung stammenden virtuellen Fahrzeuge reagieren auf das Messfahrzeug und bilden einen Stau. Der Versuchsträger muss eine entsprechende Lücke erwischen, um in den linken Kreuzungsarm einzufahren. Abbildung 5.15 stellt den Ablauf der Ausführungsphase dar.

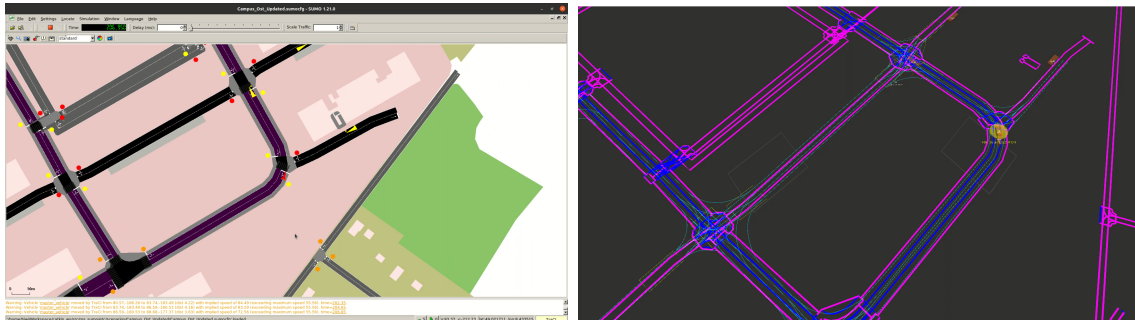
Zur Evaluation werden zwei Größen herangezogen, die Umlaufzeit sowie die Ausfallrate der Nachrichtenpakete. Die Umlaufzeit erlaubt eine Einschätzung der Verzögerung innerhalb des Kommunikationsstapels (engl.: „*communication stack delay*“) [283]. Dieser bemisst die Zeit von der Generierung der Nachricht in der Facility Schicht (engl.: „*facility layer*“) bis zu seiner Übertragung auf der Bitübertragungsschicht (engl.: „*physical layer*“) und stellt damit eine theoretische untere Grenze für das Alter einer Information innerhalb eines übertragenen Nachrichtenpakets dar, bis es beim Empfänger ankommt [283]. In der vorliegenden Arbeit wird die Umlaufzeit innerhalb des infrastrukturellen Testsystems gemessen und berücksichtigt damit auch die Verzögerung zwischen OBU und OTS (engl.: „*on-board testsystem*“), vgl. Abbildung 4.28. Die Ausfallrate gibt einen weiteren Indikator für die Robustheit der Kommunikation an. Sie bestimmt, ob die Pose des Versuchsträgers in der Simulation eintrifft, und das Verhalten des Ego-Fahrzeugs damit in der Simulation berücksichtigt wird. Weiterhin bestimmt sie, wie verlässlich augmentierte Fahrzeuge die autonome Fahrfunktion erreichen.

Die Frequenz des Informationsaustauschs stellt eine wesentliche Größe dar, um die aktuelle Pose des Versuchsträgers in die Verhaltenssimulation zu übertragen und das resultierende Verfahren der virtuellen Verkehrsteilnehmer an das OTS zu übertragen, wo weitere Sensor- oder Umweltmodelle zur Augmentierung angeschlossen werden können. Da typische ETSI ITS-G5-Dienste je nach Szenendynamik für Frequenzen im Spektrum 1 - 10 Hz ausgelegt sind, und die dezentrale Staukontrolle eine maximale Sendefrequenz von  $f_{\max} = 40$  Hz vorgibt, werden folgend zwei Parametrierungen mit  $f_{tx}^l = 20$  Hz und  $f_{tx}^h = 30$  Hz gegenübergestellt. Die Nachrichtenverarbeitung und -übermittlung, sowie Datenaufzeichnung seitens Testsystem laufen dabei um ein Vielfaches.

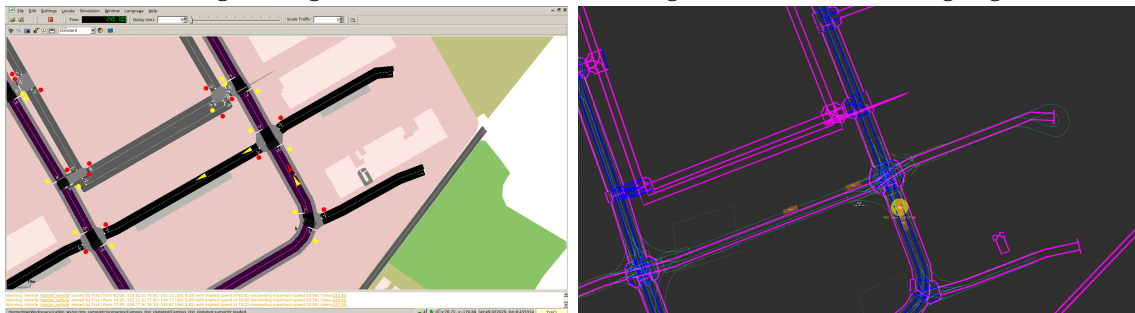
Abb. 5.16 stellt die Testfahrten zweier verschiedener Parameter gegenüber. Für eine Kommunikationsfrequenz von  $f_{tx}^l = 20$  Hz, siehe Abbildung 5.16a, ergibt sich eine durchschnittliche Umlaufzeit von  $\mu \approx 127.9$  ms mit einer Standardabweichung von  $\sigma \approx 26.3$  ms. Es gehen jedoch im Durchschnitt ca.  $\frac{1}{4}$  der Nachrichten verloren. Für eine höhere Kommunikationsfrequenz von  $f_{tx}^h = 30$  Hz ist zwar die durchschnittliche Umlaufzeit mit  $\mu \approx 104.6$  ms und einer Standardabweichung von  $\sigma \approx 24.29$  ms geringer und Informationen werden somit schneller ausgetauscht, allerdings gehen nun ca.  $\frac{1}{3}$  aller Nachrichten verloren. Es lässt sich somit eine einseitige Verzögerung innerhalb des Kommunikationsstapels in der Größenordnung von  $\approx 50$  ms bei  $f_{tx}^h = 30$  Hz ableiten. Betrachtet man die Verzögerung auf beiden Seiten im Bezug zu den innerhalb dieser Zeit potentiell zurückgelegten Strecken von Versuchsträger und virtuellen Agenten, ergibt sich bei Geschwindigkeiten im periurbanen Raum ein zurückgelegter Weg von  $\approx 60$  cm und im urbanen Raum von  $\approx 150$  cm, siehe Abb. 5.16d.



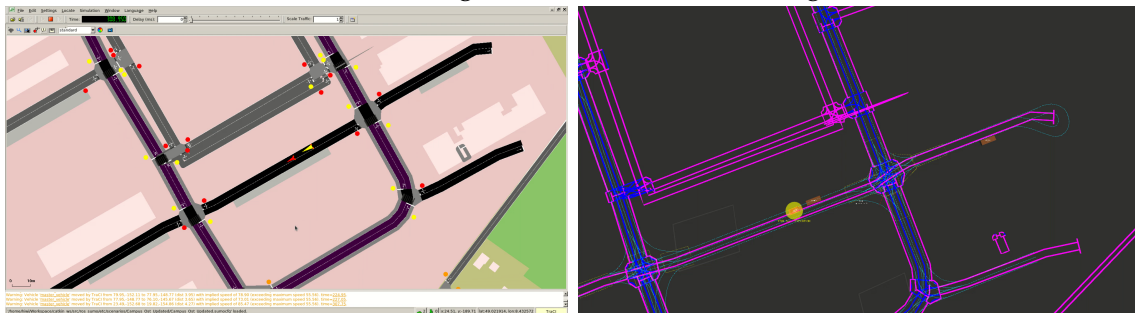
(a) Annäherung des Messfahrzeugs an Kreuzung. (b) Das Messfahrzeug hält in der Kreuzung. (c) Das Messfahrzeug verlässt die Kreuzung.



(d) Der Avatar des Fahrzeugs wird im digitalen Zwilling bewegt. (e) Darstellung der Pose des Eigenfahrzeugs mit Zustandsanzeige (gelb).



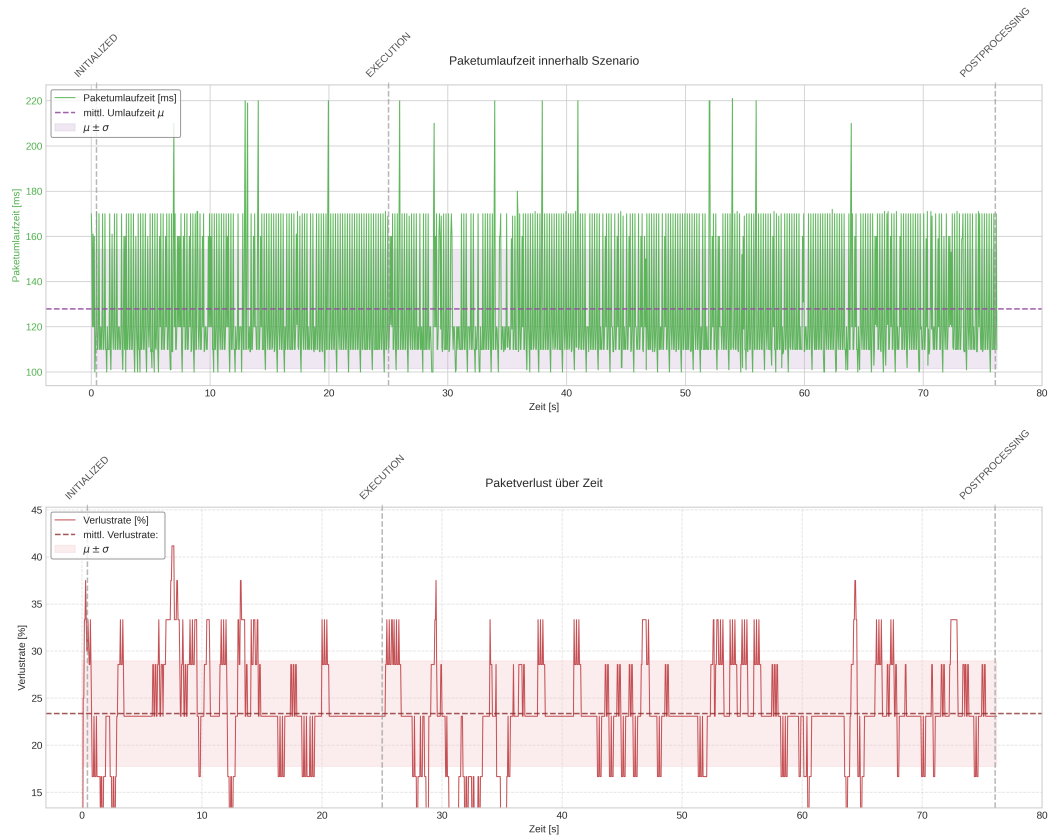
(f) Der Avatar wirkt als Hindernis für ein auffahrendes, virtuelles Fahrzeug. (g) Darstellung im Versuchsträger stellt virtuelle Fahrzeuge dar.



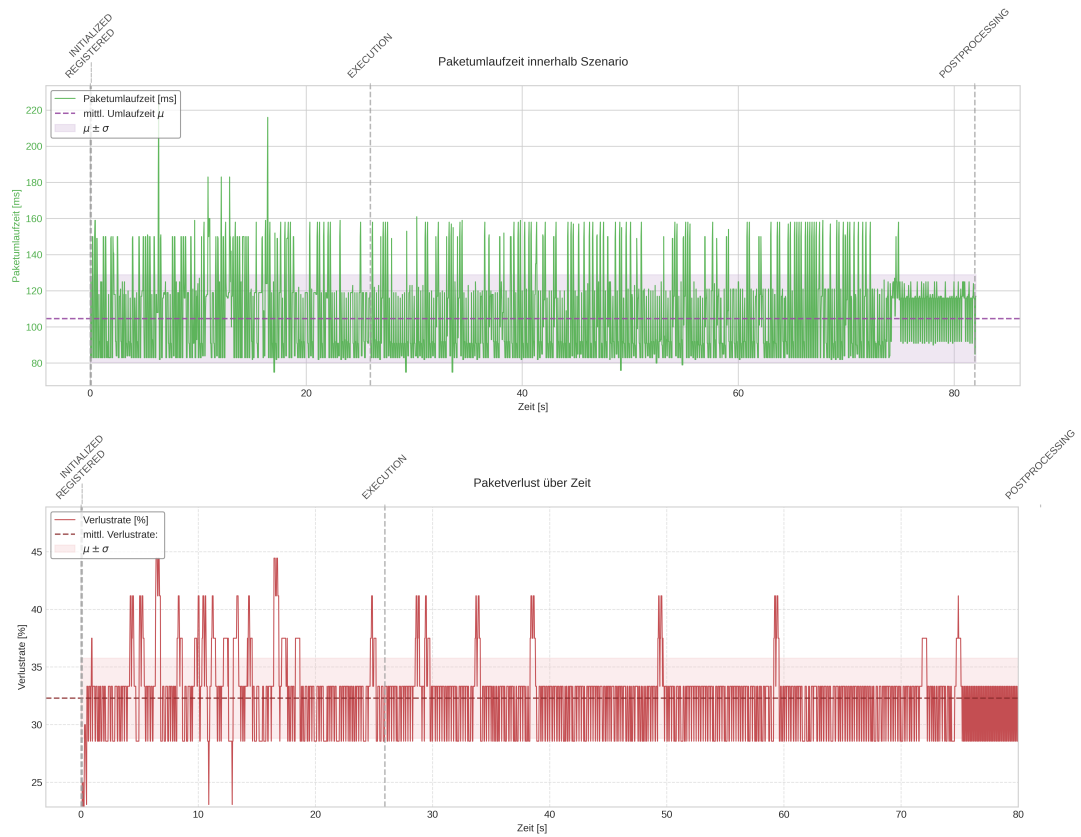
(h) Das virtuelle Fahrzeug agiert auf den Avatar im digitalen Zwilling. (i) Darstellung zeigt dem Fahrer das auffahrende, virtuelle Fahrzeug an.

Abbildung 5.15: Ausführungsphase: Das fahrzeugseitige tauscht mit dem infrastrukturseitigen Testsystem die Pose von CC-NG und die der virtuellen Verkehrsteilnehmer des digitalen Zwillings aus.

## 5 Evaluation



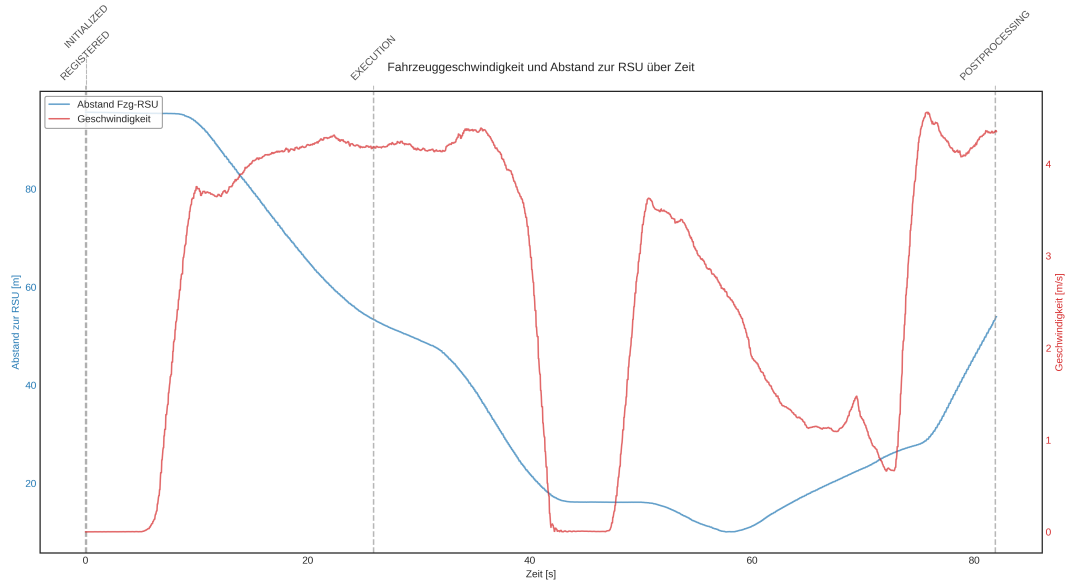
(a) Umlaufzeit und Verlustrate bei Durchlauf eines beispielhaften Testszenarios mit  $f_{tx}^l = 20$  Hz.



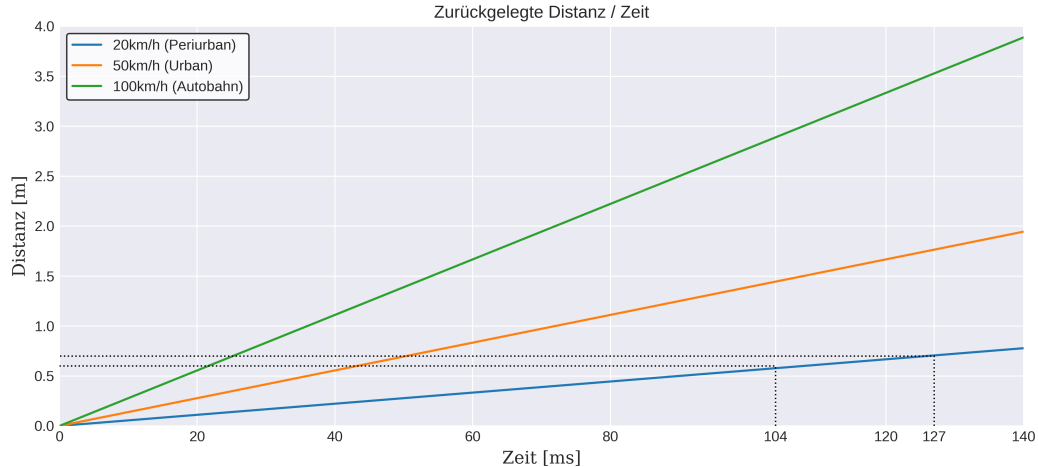
(b) Umlaufzeit und Verlustrate bei Durchlauf eines beispielhaften Testszenarios mit  $f_{tx}^h = 30$  Hz.



Der Vergleich der Umlaufzeit und der Verlustrate in Bezug auf Geschwindigkeit und Distanz zwischen Fahrzeug und Roadside Unit zeigen auf, dass Mittelwert und Standardabweichung beider Werte über die Fahrt hinweg annähernd konstant sind, siehe Abbildungen 5.16b und 5.16c. Die bemessenen Metriken scheinen von den aufgetragenen Fahrzeuggeschwindigkeiten und Abstände zur RSU nicht beeinflusst zu werden.



(c) Verlauf der Fahrzeuggeschwindigkeit und Distanz zur Roadside Unit für Erprobungsfahrt mit  $f_{tx}^h = 30$  Hz.



(d) Umlaufzeiten und resultierende Fahrzeug-Distanzen für verschieden typische Geschwindigkeiten. Darstellung entlehnt an [Zofka et al., 2022].

Abbildung 5.16: Auswertung der Testfahrten zur Vernetzung von Infrastruktur und Fahrzeug mittels ETSI ITS-G5. Die versendeten Nachrichten wurden hierbei nicht verschlüsselt und nicht signiert.

Die Umsetzung der Vernetzung mit ETSI ITS-G5, empirische Erprobung mit dem Versuchsträger CC-NG und Analyse zeigt zwar eine grundsätzliche Machbarkeit

der verteilten Co-Simulation, aber gleichzeitig Optimierungsbedarf auf:

Die wesentliche Anforderungsgröße ist die benötigte Frequenz der beteiligten Simulationsmodelle in dem infrastruktur- und fahrzeugseitigen Testsystem. Wenn beispielsweise Sensoren simuliert werden, orientiert sich deren Frequenz an den realen Sensorsystemen, wie bei aktuellen Lidarsystemen im Bereich von 10 – 20 Hz. Dies gilt ebenfalls für die Lokalisierung des Fahrzeugs durch GNSS/INS oder sonstige Sensorsysteme, die typischerweise zwischen 10–50 Hz rangiert und damit eine Lokalisierung für das Testsystem bietet. Zur Simulation von Sensorsystemen ist es daher erstrebenswert, Frequenzen um mindestens 40 Hz, vor allem aber mit einer geringeren und robusten Streuung zu erzielen. Zur Erhöhung der Kommunikationsfrequenz und Latenzminimierung sind Filtermechanismen zur Anwendung innerhalb des Testsystems durch Übertragung von Zeitstempel und Anpassungen im ETSI ITS-G5-Netzwerkstack zu untersuchen.

Ein Ansatzpunkt hierfür ergibt sich bei der dezentralen Staukontrolle (engl.: „*decentralized congestion control*“) des ETSI ITS-G5-Netzwerkstacks. Diese soll ein Abfallen der Leistung durch eine zu hohe Kanalauslastung bei gleichzeitiger Gewährleistung eines fairen Medienzugriffs auf das Medium gewährleisten [284]. Hierfür definiert die Norm [285] von Staukontrollalgorithmen einzuhaltende zeitlichen Schranken, der Übertragungsdauer  $T_{\text{on}}$  einer Nachricht von  $0 < T_{\text{on}} \leq 4 \text{ ms}$  sowie der Zeitspanne  $T_{\text{off}}$  zweier aufeinanderfolgenden Übertragungen mit  $T_{\text{off}} \geq 25 \text{ ms}$  in Abhängigkeit des Kanalbelegungsgrads (engl.: „*channel busy ratio*“). Dies wirkt sich folglich auf die maximale Sendefrequenz sowie die Stabilität der Übertragung aus. Für den Transfer dieser Technologie hin zur Kommunikation innerhalb eines Testsystems bietet die Abschätzbarkeit der gleichzeitigen Teilnehmer auf Prüfgelände oder Testfeld eine Möglichkeit die Annahmen abzuschwächen und Algorithmen zu optimieren. Bestehende Mechanismen, wie eine *Multi Channel Operation* oder nachrichtentypbasierte Priorisierung, sind hierfür zu untersuchen, wie auch insbesondere des in Entwicklung befindlichen, und abwärtskompatiblen V2X-Standards IEEE 802.11bd [286, 287].

Das definierte Datenpaket bietet mehrere Ansatzpunkte einer weiteren Optimierung. So können unter anderem Verkehrsteilnehmer mit ihren Abmaßen vorab als Datenmodelle innerhalb des fahrzeug- und infrastrukturseitigen Testsystems gespeichert werden und dann lediglich in Form von Indizes innerhalb des Datenpakets kodiert werden. Je nach Anforderungen an die Auflösung von Attributen können beispielsweise auch Abmaße als ganzzahlige Dezimeter kodiert werden, um Speicherplatz einzusparen. Ebenfalls können Attribute, wie die Senderidentifikation, aus dem Geonetworking Header genutzt werden.

Die vorliegende Evaluation stützt sich im Wesentlichen auf Beobachtungen und Erkenntnissen eines eng gesteckten Kreuzungsszenarios. Weitere Untersuchungen sind notwendig, inwieweit sich höhere Geschwindigkeiten und Distanzen zwischen RSU und OBU auf die Qualität der Verbindung und Generalisierbarkeit auf Szenarien höherer Geschwindigkeiten, wie Überland- oder Autobahnfahrten, auswirken. Dies kann beispielsweise in vorgestelltem Fähigkeitenmodell von Testfeldern und Prüfgelände mitkodiert werden.

## 5.7 Abschließende Betrachtung

Die in der vorliegenden Arbeit erforschten, virtuell erweiterten Prüfgelände und Testfelder lassen sich in die Betrachtung nach [253, 254] einordnen, siehe Abb. 5.17. Das zentrale Element des Metamodells wird dabei unter Berücksichtigung der in Abschnitt 3.3 formulierten Anforderungen nochmals aufgegriffen und eingeordnet. Das Metamodell  $\mathbb{S} = (\mathbb{U}, \mathbb{V}, \mathbb{I})$  erlaubt die Ableitung von Testsystemkonfigurationen mit konkreten Zusammensetzungen der Modelle mit  $\mathbb{S}_i = (\mathbb{U}_i, \mathbb{V}_i, \mathbb{I}_i)$ .

Das Real- und Restfahrzeug wird als Serien- oder äquivalentes Fahrzeug (emuliert) integriert. Somit kommen auch die fahrzeugeigenen, propriozeptiven Sensoren zum Einsatz und werden nicht simuliert. Ebenso wird ein Lokalisierungssystem mit entsprechender Präzision eingesetzt, um den Grundwahrheitscharakter zu gewährleisten. In der vorliegenden Betrachtung ist der Versuch vorherrschenden Umgebungseinflüssen unterlegen<sup>3</sup>. Die Szenerie, die dynamischen Elemente mit ihrem spezifischem Verhalten sowie das SuT und damit einhergehende Schnittstellen stellen die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Kategorien dar.

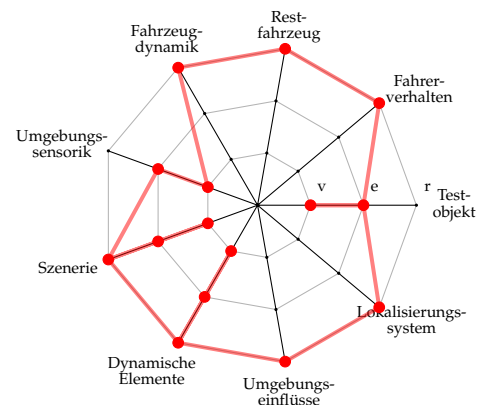


Abbildung 5.17: Absicherung auf virtuell erweiterten Testfeldern.

Da das Testobjekt im Verbund mit Realfahrzeug und der benötigten Schnittstellen innerhalb der Systemarchitektur als Rapid Prototyping System innerhalb der virtuell erweiterten Testfelder und Prüfgelände vorliegt, eignet sich der Test insbesondere für die Bewertung und Datenakquise bei realem Fahrverhalten bei dem Bedarf einer schnell veränderlichen Szenerie, dynamischen Elementen und verschiedenen Möglichkeiten Zugängen zur zu testenden Fahrfunktion. Insbesondere, um zwischen Umgebungswahrnehmung (auch auf Basis von augmentierten Sensordaten) bis in die Planungskomponenten hinein zu testen.

Der Modellcontainer  $\mathbb{U}$  bietet die **flexible Abbildbarkeit realer Straßen- und Verkehrsszenen**. Entsprechend den zur Verfügung stehenden Fähigkeiten von Testfeldern und Prüfgelände, deren Ausstattung zur Beobachtbarkeit und Kontrollierbarkeit, werden Szenerien mit realen und augmentierten Entitäten aus einer ODD generiert. Hierzu sind die zu berücksichtigenden Prüfgelände, Testfelder auf ihre abzubildenden, statischen Verkehrsszenarieelemente vorab zu zerlegen und zu modellieren. Diese wurden aufgrund der „Closed World“ Annahme nicht

<sup>3</sup>In der vorliegenden Arbeit wurden Dummy-Konstruktionen und Anlagen zur Manipulation der Umgebungseinflüsse, siehe auch Abschnitt 2.5, nicht berücksichtigt.

evaluiert, eignet sich jedoch als Approximation und Grundlage des Augmentierungsgrads für die Verkehrsszenerie  $\zeta$  (Formel 4.10) mit  $\zeta: \mathbb{U} \mapsto [0, 1]$ :

$$\zeta(u) = 1 - \frac{m}{n} \quad \text{mit } n = \text{const.}$$

Am Beispiel des AVP können die beiden Szenariemodelle eines Parkhaus-Szenarios auf der Freifläche eines Prüfgeländes  $\mathbb{U}_f$  mit dem Augmentierungsgrad  $\zeta_f$ , siehe Abbildung 5.10, einem Parkhaus als exemplarisch als Testfeld mit  $\zeta_p$ , siehe Abbildung 4.27c, mit  $0 < \zeta_f < \zeta_p < 1$  gegenübergestellt werden. Die Freifläche stellt dabei ein schwaches Basismodell mit dem augmentierten Parkhaus als starkes Augmentierungsmodell dar, wohingegen das Parkhaus im Testfeld mit einem starken Basismodell ein geringes Augmentierungsmodell benötigt.

**Realistische Interaktionen zwischen Verkehrsteilnehmern und dem automatisierten Fahrzeug sollen gefahrenlos testbar** gemacht werden. Über die zwischen Realität und Virtualität aufgezugene Skala können Kombinationen aus Modellen und Referenzmesssystemen ergänzt werden, die Verhalten auf Basis von Gelenk- oder Körperbewegung, Gestik oder gar Mimik erfassen und die dann um weitere, modellbasiert abgeleitete, Informationen ergänzt und auf einen Avatar geprägt werden. Die räumliche Trennung und vorgestellte Immersion erlauben ein gefahrenloses Testen kritischer Szenarien.

Entsprechend den Anforderungen an die Testung des SuT ist auch hier eine Zerlegung eines Verhaltensmodells in eine sequentielle Teilmodellierung eines agentenbasierten Verhaltens vorzunehmen. Perzeption und Aktorik werden separat über zwei Augmentierungsfunktionen betrachtet, um der Vielfältigkeit der Immersion einer Person oder Probanden Rechnung zu tragen. Die Augmentierungsfunktionen  $\gamma$  und  $\tau$  (siehe Formeln 4.19 und 4.21) erlauben dabei die Beurteilung der „Immersionstiefe“ mit  $\gamma: \mathbb{V} \mapsto [0, 1]$ ,  $\tau: \mathbb{V} \mapsto [0, 1]$  und  $v \in \mathbb{V}$ :

$$\gamma(v) = \frac{a}{b} \quad \text{mit } b = \text{const.} \qquad \tau(v) = \frac{c}{d} \quad \text{mit } d = \text{const.}$$

Als wesentlicher Enabler der Abbildung realistischer Verhalten zwischen Verkehrsteilnehmer und automatisierten Fahrzeug in der Rolle eines Testingenieurs (siehe Abb. 4.20b) oder eines vulnerablen Verkehrsteilnehmers (siehe Abschnitt 5.4) wurden smarte, vernetzte Infrastrukturen wie auch Trackingsysteme zur Einbettung des Menschen identifiziert. So wurde am Beispiel eines immersiven Fußgängers die Kopfpose über ein Trackingsystem erfasst und daraus eine Körperpose abgeleitet. Hier spielt das Konzept der Vernetzung, insbesondere zur Integration verschiedener, räumlich getrennter Testteilnehmer, eine wesentliche Rolle.

Die Analyse und Identifikation exemplarischer Schnittstellen mittels **Evaluation der hochautomatisierten Fahrfunktion** zeigt die Möglichkeit der Ersetzung von

algorithmischen Teilfunktionen mit Simulations- oder Umweltmodellen nebst zugehöriger Grundwahrheit aus dem digitalen Zwilling. Hierfür muss ebenfalls eine Aufteilung der zu betrachtenden, hochautomatisierten Fahrfunktion durchgeführt werden. Dann beschreibt der Augmentierungsgrad  $\eta$  die Tiefe zwischen Sensorik und Umweltmodell, in der das real-virtuelle Umgebungsbild erzeugt und der Fahrfunktion zugeführt wird. Der Augmentierungsgrad ergibt sich dann (siehe auch Formel 4.27) mit  $\eta: \mathbb{I} \mapsto [0, 1]$  und  $i \in \mathbb{I}$  zu:

$$\eta(i) = \frac{r}{s} \quad \text{mit } s = \text{const.}$$

In der vorliegenden Arbeit wurde die Augmentierung anhand verschiedener Schnittstellen aufgezeigt und evaluiert. So wurde die Injektion von virtuell erweiterten Szenarien an der Schnittstelle von Laserscans (Abschnitt 5.5.1), sowie an der von Kameradaten (Abschnitt 5.5.2) präsentiert. Außerdem wurde anhand der Vernetzung die Schnittstelle der Objektlisten ohne Zuführung zu einer ADAS oder HAD anskizziert, die als Basis der Vernetzung (Abschnitt 5.6) über infrastruktur- und fahrzeugseitiges Testsystem dient.

Abschließend verbleibt aufzuzeigen, wie eine mögliche Strategie zur Instanziierung verschiedener Testsystemkonfigurationen entlang virtuell erweiterter Prüfgelände und Testfelder auszusehen vermag. Die definierten Augmentierungsfunktionen ermöglichen Instanzen nach ihrer Zusammensetzung und damit Grad zwischen Virtualität und Realismus zu ordnen. Diese Ordnung erlaubt es wiederum Bewegungsmuster innerhalb des durch das Metamodell aufgespannten Raums zu definieren, die beispielsweise damit Anforderungen aus den Testzielen oder Kriterien anderer methodischen Ansätzen, vgl. [102], folgen.

Aus dem Metamodell können nun Testsystemkonfigurationen nach verschiedenen Bewegungsmustern erstellt werden. So können beispielsweise die Modellauswahl der Dimensionen Szenariemodell  $\mathbb{U}$  und Verhaltensmodell  $\mathbb{V}$  mit den Augmentierungsgraden  $\zeta$  und  $\gamma, \tau$  fixiert werden. Nun können sukzessive Modellinstanzen für die Zugriffstiefe  $\mathbb{I}$  zum SuT gemäß ihrem Augmentierungsgrad  $\eta$  gebildet, und Modellparameter variiert werden - es entsteht somit ein Bündel an abzutestenden Testszenarien. Dieses Bewegungsmuster sichert somit den Prüfling ab, indem für die Anwendung einer Szenerie und einer Verhaltensimmersion verschiedene Zugänge des SuT sukzessiv von der Augmentierung der Sensorik bis schließlich im Umweltmodell, getestet wird.

Dieses Vorgehen kann auf die in Abb. 4.5 aufgezeigten Bewegungsmuster verallgemeinert werden. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass lediglich eine Auswahl für eine Dimension aus  $\mathbb{U}, \mathbb{V}$  und  $\mathbb{I}$  konstant gehalten wird. Dies ist insbesondere dann charakteristisch, wenn ein Prüfgelände oder Testfeld im öffentlichen Verkehr verwendet und für ein bestimmtes Szenario virtuell erweitert wird, also  $\mathbb{U}$  konstant gehalten wird. Dann werden  $\mathbb{V}$  und  $\mathbb{I}$  variiert, um die HAD entlang variierender Schnittstellen und variierender Immersionen oder modellbasierten Verhaltensmodellen, bspw. in Dauerlauftests, abzusichern. Zur Adressierung dieser Testsystemkonfigurationen und Darstellung des Gesamtnutzens verbleibt schließlich die Umsetzung zu einer gesamtheitlichen Softwarelösung.



## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Dieses Kapitel schließt die vorliegende wissenschaftliche Arbeit mit einer Zusammenfassung des Erreichten ab und stellt fortführende Forschungsfragen in den Fokus, die sich während der Erarbeitung der Forschungsfragen ergeben haben.

### 6.1 Beitrag der Arbeit

Der technische Fortschritt von erweiterten Fahrerassistenzsystemen hin zu hochautomatisierten Fahrfunktionen mündet bereits in die Produktivierung erster Serienfunktionen. So konnte kürzlich mit dem Mercedes-Benz „Drive Pilot“ nach SAE Automatisierungsstufe 3, eine Serienzulassung für den Betrieb auf deutschen Autobahnen erwirkt werden [288]. In jüngster Vergangenheit erzielte dies auch BMW mit dem „Autobahnassistent“ (Level 2+) und „Personal Pilot“ (Level 3) [289]. Allerdings stellen die dortigen, spezifischen Betriebsbedingungen (ODD) eine wesentlich strukturiertere Verkehrsumgebung mit motorisierten Verkehrsteilnehmern und baulich voneinander getrennten Richtungsfahrbahnen ohne Gegenverkehr dar. Noch bleibt insbesondere das urbane Verkehrsgeschehen aufgrund seiner Vielfältigkeit statischer Verdeckungen und kritischer Situationen mit verletzlichen Verkehrsteilnehmern solchen Automatisierungssystemen verschlossen.

Inspiziert durch die Analogien zwischen dem XIL-Paradigma und dem Milgram-Kontinuum wurde die zentrale Fragestellung entwickelt, welche Potentiale sich durch eine gesamtheitliche Betrachtung und Einbindung von Verkehrsteilnehmerverhalten in einen digitalen Zwilling erschließen lassen. Zur Motivation der folgenden Forschungsfragestellung trug ebenfalls das Aufkommen von Testfeldern und Reallaboren im öffentlichen Verkehrsraum im nationalen Umfeld, unter anderem des zeitgleichen Aufbaus des Testfeld Autonomes Fahren Baden-Württemberg, bei. Die konkrete Forschungsfrage lautete daher wie folgt:

*„Welche technischen, methodischen und algorithmischen Bausteine werden benötigt, um automatisierte Versuchsträger innerhalb von Prüfgeländen und Testfeldern in kritischen, überwiegend innerstädtischen, und in zwischen modellbasierten und datengetriebenen skalierbaren Szenarien zu bewerten?“*

Aus dieser generellen Forschungsfrage haben sich Teilfragestellungen ergeben, die in der vorliegenden Arbeit mit folgenden Einzelbeiträgen gelöst und beantwortet wurden:

- Die **Betrachtung automatisierter Fahrfunktionen aus einer situativen und technologischen Perspektive** in **Kapitel 3** verhalf zur Konzeption einer Referenzarchitektur, die herausstellt, welche Fähigkeiten und Komponenten in Anwendungen des urbanen Umfelds von Nöten sind.
- Dies wurde in **Kapitel 4.1** auf ein **Metamodell** und entsprechende Augmentierungsgradfunktionen abgebildet. Das Metamodell erlaubt die Abbildung statischer Verkehrsszenarien, dynamischen Verkehrsteilnehmerverhaltens, sowie verschiedener Injektionsschnittstellen. Die Augmentierungsgradfunktionen erlauben jeweils eine Bewertung der verwendeten Modelle entlang des Realität-Virtualität-Kontinuums.
  - Hierzu wird ein entwickeltes **Fähigkeitenmodell für Prüfgelände und Testfelder** des öffentlichen Raums mit Fokus auf Szenerie und smarte Verkehrsinfrastrukturen in **Kapitel 4.2** eingeführt.
  - Der algorithmische Baustein der **Verhaltensbeobachtung vulnerabler Verkehrsteilnehmer und dessen Abbildung in die Simulation, bzw. den digitalen Zwilling**, wird in **Kapitel 4.3** vorgestellt.
  - Schließlich wird die Darstellung und Zuführung dieser augmentierten Umwelt über **Injektionsschnittstellen** und die Zuführung mittels Sensor- und Umweltdaten in **Kapitel 4.4** detailliert.
  - Abschließend werden die zuvor genannten Bausteine innerhalb eines **verteilten Co-Simulationssystems** und der ETSI ITS-G5-basierten Einbettung und Vernetzung des Fahrzeugs mit der smarten Infrastruktur in **Kapitel 4.5** zusammengeführt.
- Der **empirische Ansatz zur Evaluation** des Testsystems mit den eben benannten Bausteine wird in **Kapitel 5** aufgezeigt.

Die vorgestellten Methoden eignen sich dabei insbesondere für Funktions- und Integrationstests, sowie für Rapid Prototyping in einem frühen Stadium der Entwicklung und Sondierung von Lösungsansätzen. Dies gilt insbesondere, wenn Mess- und Erprobungsdaten gesammelt werden müssen, die sowohl die reale Fahrdynamik des Fahrzeugs berücksichtigen, als auch Messdaten der verwendeten Algorithmen sowie Grundwahrheitsinformationen aus der Umgebung des Versuchsträgers, den dargestellten Szenarien. Dies gilt insbesondere für algorithmische Komponenten und Methoden, die auf Sensordaten und damit den durch die Methodik dargestellten, gemischt virtuell-realen Szenarien aufbauen. Dies schließt insbesondere Umgebungsmodellaufbau, die Entscheidungsfindung sowie diverse Planungskomponenten, wie Manöver- und Pfadplanung, mit ein, berücksichtigt aber ebenfalls die Aktorikanregelung und Wirkstrecke des realen Fahrzeugs.



## 6.2 Fortführende Fragestellungen

Während der Bearbeitung der vorliegenden Forschungsarbeit haben sich zahlreiche aufbauende Fragestellungen eröffnet:

So klammert das vorliegende Metamodell aufgrund des Fokus auf die Beiträge hin zu digital erweiterten Testfeldern und Prüfgeländen, die Testung der hochautomatisierten Fahrfunktion als SIL (und damit auch HIL und weitergehend) explizit aus. Dabei kann das Metamodell potentiell um diese Achse ergänzt werden. Dies gilt ebenfalls für die verschiedenen Bestandteile smarter Infrastruktur, die sukzessiv in Form von SIL oder HIL eingebettet werden können, um somit ein Testbed für vernetzte Fahrfunktionen, wie in [Schörner et al., 2021], darzustellen. Dafür müssen einzelne Bestandteile ebenfalls über entsprechende Avatarmodelle als Prüflinie in den digitalen Zwilling eingebettet werden.

Der Ansatz des Metamodells eröffnet zuerst einmal eine Modellierung von Testsystemkonfigurationen. Eine formale Beschreibung von Testzielen und deren Abbildung auf, mittels Metamodell instantiierten und formal beschriebenen Testsystemen, verbleibt jedoch künftigen Arbeiten. Gegeben eine solche, kann eine Instanz durch das Metamodell definiert und schließlich auf die benötigte Infrastruktur, wie durch das vorgestellte Fähigkeitenmodell beschrieben, abgebildet werden.

Folgende fortführenden Fragestellungen hinsichtlich der einzelnen funktionalen und methodischen Bausteine des Gesamtkonzepts haben sich ergeben:

- Das hybride Verkehrsszenariemodell unterliegt der Annahme einer abgeschlossenen Weltbeschreibung („*closed world*“). In der vorliegenden Arbeit wurde lediglich die Augmentierung, damit die Manipulation über Hinzunahme virtueller Elemente untersucht. Die vorliegende Gesamtmethodik sollte zukünftig auch in der Lage sein, entsprechende Modifikationen von Attributen realer Szenerieelemente, wie der Änderung eines Verkehrsschildtyps, oder auch deren gänzliche Eliminierung, abzubilden.
- Die Gegenüberstellung einer hochautomatisierten Fahrfunktion mit immersiven Verkehrsteilnehmerverhalten bedarf einer Zielbeschreibung des gewünschten Verhaltens, um ein Anleiten des immersiven Testteilnehmers zu ermöglichen. Nur so können gewünschte Grenzfälle der resultierenden Verkehrssituation oder des Verkehrsteilnehmerverhaltens bewusst erzeugt werden. Solche Beschreibungen können sich beispielsweise an Manöverbeschreibungen und Datenformaten, wie OpenSCENARIO, orientieren.
- Es haben sich Anforderungen ergeben, die sich in notwendigen Optimierungen der Testinfrastruktur niederschlagen. Hier sind architekturelle Verbesserungen zur Lokalisation der Testteilnehmer, wie mittels DGPS/INS- und Infrastruktursensorik fusionierter Lokalisation, Detektions- und Trackingverfahren zur Erfassung von Blickrichtung, Gestik oder auch Mimik, zu benennen.

- Die vorgestellten Mechanismen zur Augmentierung über die Injektionsschnittstellen ignorieren bisher Umgebungseinflüsse, wie Beleuchtungs-, Wetter- oder Anomalieeffekte, die sich auf Sensordatenebene auswirken. Diese auch mittels generativer KI gestaltbarer Modelle können Injektionsmuster bereitgestellt werden, um Augmentierung allgemeingültiger zu gestalten.
- Die Modellierung der Sensoraufhängung beim Betrieb auf Prüfgeländen und Testfeldern unter Berücksichtigung von Nick-, Wank- und Rollwinkel des Fahrzeugs unterstützt insbesondere die Testung von Fahrmanövern auf diversem urbanen Straßenuntergrund, wie Kopfsteinpflaster. Dies vermeidet sich verstärkende Modellfehler von der Lokalisation über die Verortung auf dem Geländemodell, bis hin zur Augmentierung.
- Die Umsetzung der Vernetzung mit ETSI ITS-G5 hat zahlreiche Optimierungsmöglichkeiten aufgezeigt. So müssen beobachtete Latenzen und Ausfallraten wesentlich verringert werden. Zahlreiche Ansatzpunkte wurden hier im Kontext des Kommunikationsstack identifiziert.

Vor dem Hintergrund des Testens auf Prüfgeländen und Testfeldern des öffentlichen Verkehrs ergeben sich folgende Fragestellungen: Einerseits bietet der vorliegende Ansatz Chancen für eine Skalierung. Dieser kann weiterentwickelt werden, um den Aufbau von digitalen urbanen, mit immersiven und modellbasierten Verkehrsteilnehmern belebten, Innenstädten auf Prüfgeländen zu ermöglichen. Ein solches Vorgehen würde einen wesentlich höheren Durchsatz an getesteten Interaktionen ermöglichen. Andererseits wurden die Augmentierungsmethoden im Kontext von sicheren Umgebungen von Prüfgeländen erforscht, wo eine entsprechende Einflussnahme in den Testprozess und dargestellten Verkehr möglich ist. Allerdings eröffnen sich durch eine Kombination mit *Silent Testing* neue Ansätze für die Anwendung der vorgestellten Methoden auf Testfelder des öffentlichen Raums, und somit eine höhere Testabdeckung zu erzielen.

Die vorliegende Arbeit hat sich auf die Abwägung zwischen der Realität über die datengetriebene Messung und Beobachtung (Online-Messung) und der reinen modellbasierten Abbildung konzentriert. Zeitgleich hat sich ein paralleler Forschungszweig ergeben, der die Modellierung von Verkehrsaspekten (Szenarien, Verhalten, Aussehen, ...) über die Generalisierung von Beobachtungen mittels generativen KI-Methoden hervorgebracht hat. Beide lassen sich als Ausprägungen datengetriebener Verfahren verstehen, die den reinen modellbasierten Ansätzen aus Expertenwissen gegenüberstehen, siehe Abbildung 6.1.

Die durch KI-Verfahren generierten Modelle müssen entsprechenden Anforderungen genügen, um selbst als Testsystembestandteile verwendet werden zu können. Diese Anforderungen umfassen dabei Eigenschaften der Erklär- und Nachvollziehbarkeit, der Trainings- und Testdatenbeschreibung, sowie Schnittstellen und Modellbeschreibung. Erst dann kann eine Integration in virtuelle Absicherungsumgebungen geklärt werden. Erste Forschungsarbeiten in dieser Richtung wurden in [Muetsch et al., 2023] unternommen und werden sich auf Datenquellen, wie das TAF-BW, stützen [Weber et al., 2022].

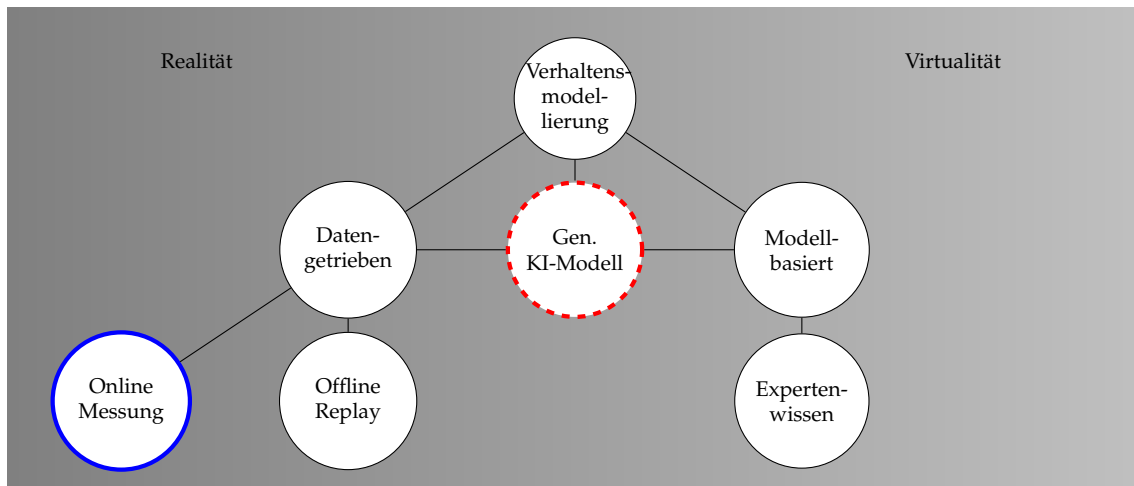


Abbildung 6.1: Die vorliegende Arbeit fokussierte sich auf die Ersetzung von expertenwissenbasierten mit datengetriebenen Modellen über Referenzmesssysteme (blau). Zeitgleich kamen Verfahren der datengetriebenen Abstraktion durch generative KI-Modelle (rot) auf.

## 6.3 Schlusswort

Mit der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass Prüfgelände und Testfelder des öffentlichen Verkehrs mit zahlreichen entsprechenden Werkzeugen Bestandteil des Absicherungsprozesses werden können. Die entwickelten Methoden und Werkzeuge können dann Einzug in Prüfstandskonzeption mit einer Landschaft vielfältiger Hardware- und Software-Tools finden, um somit zur Absicherung hochautomatisierter Fahrzeuge im urbanen Umfeld angewendet zu werden. Die skizzierten Konzepte sind dabei auch offen für eine Applikation verteilter Prüfstände zur Emulation weitläufiger urbaner Verkehrsszenarien, auch über verteilte Standorte hinweg.

Es verbleibt nun schließlich der Wissenschaft die aufgeworfenen Forschungsfragen weiter zu verfolgen. Insbesondere obliegt es der Industrie, die vorgestellten Methoden und Verfahren in die eigenen Werkzeugketten zu integrieren und zu robustifizieren. Gleichzeitig müssen die aufgezeigten Verfahren zugelassen werden, um als belastbare Werkzeuge in die Sicherheitsargumentation automatisierter Fahrfunktionen integriert werden zu können. Insbesondere die Findung einer belastbaren Definition der Realitätsnähe, der Glaubwürdigkeit und Zuverlässigkeit (engl. „*credibility*“) ist hierzu noch zu verfolgen. Erst dann wird es der Regulatorik und den entsprechenden Prüfstellen möglich, das skizzierte Testkonzept beziehungsweise Dokumentationen und Anwendungsnachweise als verpflichtend für Zulassung und Homologation dieser Systeme zu fordern und schließlich eine Integration in den automobilen Absicherungs- und Freigabeprozess erfolgen kann.

Die vorliegenden Lösungsbausteine wurden in diversen, durch die öffentliche

Hand geförderten Forschungsprojekte, insbesondere in den Projekten ENABLE-S3, SmartEPark und VVMethoden, erarbeitet. Über die enge Zusammenarbeit mit den wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Partnern wurden die vorgestellten funktionalen und methodischen Bausteine konzipiert und diskutiert. Schließlich fanden die zugrunde liegenden Forschungsarbeiten auch damit Einzug in den Stand der Technik. Hierzu tragen auch die im Rahmen der Arbeit veröffentlichten Open Data Datensätze [Schörner et al., 2022, Fleck et al., 2020] bei. Nun müssen sich die vorgestellten Methoden letztendlich in den aufbauenden Forschungsarbeiten beweisen, und somit einen Beitrag für die Ermöglichung automatisierter Fahrzeuge im urbanen Verkehrsgeschehen leisten.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Beispielhafte Anwendungen des hochautomatisierten Fahrens. . .	1
1.2	Stufen des automatisierten Fahrens nach VDA e. V.. . . . .	2
1.3	Struktureller Aufbau der vorliegenden Arbeit. . . . .	9
2.1	Exterozeptive Sensoren des automatisierten Fahrzeugs CoCarNG. .	14
2.2	Vergleich der V2X-Netzwerkprotokoll-Stacks IEEE 802.11p und 3GPP LTE C-V2X. . . . .	15
2.3	Taxonomie des Testens zur Bewertung von ADAS und HAD. . . .	18
2.4	3-Kreismodell nach [66]. . . . .	19
2.5	Das V-Modell. . . . .	22
2.6	Taxonomien und Terminologie und Strukturierung von Verkehrs- szenarien des szenarienbasierten Testens. . . . .	25
2.7	Strukturierung von Validierungssystemen [126]. . . . .	27
2.8	Miniaturrellenprüfstand . . . . .	29
2.9	Exposition von Testszenarien auf Prüfgeländen mittels Zielobjekten.	31
2.10	Konzept und Umsetzungsbeispiele mobiler, smarter Referenzinfrastruktur zur flexiblen Erfassung von Verkehrssituationen. . . . .	33
2.11	Analyse von Erprobungsstrecken für ein E-Mobilitätsassistenzsystem.	34
2.12	Milgram-Kontinuum. . . . .	43
3.1	Hierarchische Modellierung des operativen, zulässigen Betriebs- bereiches. . . . .	46
3.2	Herausforderungen urbaner Verkehrsszenen: Kreuzungs- und Ver- deckungssituationen sowie Verkehrsmischflächen. . . . .	49
3.3	Automated Valet Parking-System des Versuchsträgers CoCarZero.	51
3.4	Systemarchitektur des AVP-Systems. Bildquelle: [Klemm et al., 2016] © 2016 IEEE. . . . .	52
3.5	Sensor- und Rechnersysteme der EVA-Shuttles. Bildquelle: [Ochs et al., 2025] © 2025 IEEE. . . . .	54
3.6	Systemarchitektur der automatisierten Fahrfunktion der EVA-Mini- Shuttle. . . . .	55
3.7	Versuchsträger BerthaOne des KIT/FZI-Team AnnieWAY. . . . .	57
3.8	Systemarchitektur der kooperativen Fahrfunktionen von BerthaOne.	58
3.9	Referenzarchitektur einer hochautomatisierten Fahrfunktion. . . .	59
4.1	Vergleichende Radar-Diagramme zwischen Simulation und der Real- erprobung. . . . .	66
4.2	Abbildung der unterschiedlichen Verkehrsaspekte auf das Virtualität- Realität-Kontinuum nach Milgram. . . . .	68

4.3	Augmentierung von Verkehrsszenen aus realen und virtuellen Verkehrsszenerelementen und Verkehrsteilnehmern. . . . .	69
4.4	Metamodell orchestriert Instantiierung der Modellklassen und somit die Ableitung von Testsysteminstanz und Testszenarien. . . . .	71
4.5	Grenzziehende Bewegungen durch den durch das Metamodell aufgespannten Raum der Testsystemkonfigurationen. . . . .	72
4.6	Systemverbund zur Erfassung, Ableitung und Kommunikation von Verkehrssituationen mit LRU. Darstellung stark modifiziert nach [Fleck et al., 2018]. . . . .	74
4.7	Fähigkeitenmodell zur Charakterisierung von Testfelder und Prüfgelände. . . . .	77
4.8	Begrifflichkeiten von Elementen auf Testfeldern und Prüfgeländen. . . . .	78
4.9	Vergleich der Modellierung mittels OSM und Llet am Beispiel der Prüfgelände Singapur CETRAN und KIT Campus Ost TAF-BW. . . . .	79
4.10	Konzept des hybriden Modells: Szenerieschablonen . . . . .	81
4.11	Augmentierung von Verkehrsszenarien. . . . .	82
4.12	Unterscheidung einer internen und externen Fahrzeugortung. . . . .	84
4.13	Verarbeitungskette der intelligenten Infrastruktur im TAF-BW. . . . .	86
4.14	Mess- und Zustandsgrößen der Objektlisten, Lichtsignalanlagenphasen und lokalen Kreuzungs- und Kreuzungsübergangskarten des TAF-BW Datensatzes. . . . .	88
4.15	Die Visualisierung der Verkehrssituation erlaubt eine intuitive Einschätzung der beobachteten Situation auf dem Testfeld. Bildquelle: [Töttel et al., 2021]. Mit freundlicher Genehmigung von Springer Nature. . . . .	89
4.16	Abbildung der Integration von verletzlichen Verkehrsteilnehmern . . . . .	92
4.17	Avatarmodell zur Immersion von Fahrenden und Fußgängern. . . . .	94
4.18	Modellierung des Fußgängergruppenverhaltens an Lichtsignalanlagen. . . . .	95
4.19	Labora Aufbau zur VR-Integration. . . . .	96
4.20	Kamerabasierte Methode zur robusten Erfassung der Fahrer Kopfpose trotz fahrdynamischer Einflüsse. . . . .	99
4.21	Abbildung des Milgram-Kontinuums. . . . .	101
4.22	Sensordatenverarbeitung mittels einzelner und integrierter Sensorensysteme zum Aufbau des expliziten Umweltmodells. . . . .	103
4.23	Prinzip von Proxy-Komponenten zur Augmentierung. . . . .	104
4.24	Digitaler Zwilling des Versuchsträgers mit Sensormodell zur Einbindung in das Testsystem unter Berücksichtigung des physikalischen Erfassungsprinzips und Sensorwirkweise. . . . .	106
4.25	In den Messraum von Kamera- und Lidar-Sensoren transformierte Grundwahrheit der abgetasteten Objekten, wie die eindeutige Objektkennung, oder Abstand zum Objekt. . . . .	110
4.26	Augmentierung realer Kameradaten mit Kamera-Sensormodells IPG CarMaker Video Data Stream. (a) und (b) aus [Zofka et al., 2014b], © 2014 IEEE. . . . .	112
4.27	Augmentierung der Lidar-Fusionseinheit von CoCar. . . . .	113

4.28	Testsystemarchitektur. . . . .	115
4.29	Konzeptueller Detailüberblick einer Testleitstandsarchitektur. . . .	116
4.30	Die Benutzeroberfläche der smarten Infrastruktur zum Monitoring. . .	117
4.31	ROS-basierte Co-Simulation. . . . .	118
4.32	UML-Sequenzdiagramm. . . . .	119
4.33	Phasen der Testdurchführung am Beispiel eines AVP-Systems, . . .	120
4.34	Einbettung der Protokollimplementierung in die bestehende ITS-S Referenzarchitektur. Bildquelle: (a) [Zofka et al., 2023], © 2023 IEEE. (b) und (c) leicht modifiziert ggü. [Zofka et al., 2023]. . . . .	123
5.1	Hochgenaue Karten des TAF-BW. . . . .	127
5.2	Ausrüstung der Erprobungskreuzung des TAF-BW am KIT Campus Ost entlang Nord-Süd Ausrichtung mit dem Messfahrzeug CC-NG und Signalstärke zu RSU #2. . . . .	129
5.3	Abbildung des Untergeschosses Parkgarage Fasanengarten. . . . .	130
5.4	Augmentierung des TAF-BW Erprobungsgeländes mit statischen Elementen und Verkehrsteilnehmern. . . . .	131
5.5	Verhaltensmodellbasierte Modellierung der Interaktion von Fahrzeug und Fahrer. Straßenmodell (schwarz), Fahrzeug (gelb), Fußgänger (blau), Parkplätze (rot), Ladesäule (hellblau). . . . .	132
5.6	Erprobungsfläche für die Immersion von Fußgängern. . . . .	133
5.7	Analyse des Verkehrsszenarios A: Exposition des Kreuzen Manövers ggü. der hochautomatisierten Fahrfunktion. . . . .	136
5.8	Analyse des Verkehrsszenarios B: Exposition des <i>Step-in-step-out</i> Manövers ggü. der hochautomatisierten Fahrfunktion. . . . .	138
5.8	Auswertung des Verkehrsszenarios 2 . . . . .	139
5.9	Geometrische Modellierung der Versuchsträger Shuttle ELLA und CoCar mittels URDF. . . . .	140
5.11	Auswirkungen von Kantenglättung und Modellierung zusätzlichen Schlagschattens auf die Fahrzeugerkennung. . . . .	145
5.12	Augmentierung hin zu einer kritischen Auffahrsituation auf einer Autobahn. Veröffentlicht in [Zofka et al., 2014b], © 2014 IEEE. . . .	146
5.13	Augmentierung des Rundkurses des TAF-BW mit statischen und dynamischen Verkehrsteilnehmenden. . . . .	148
5.14	Reprojektion des Straßenmodells in die Kameradaten . . . . .	149
5.15	Ausführungsphase: Das fahrzeugseitige tauscht mit dem infrastrukturseitigen Testsystem die Pose von CC-NG und die der virtuellen Verkehrsteilnehmer des digitalen Zwillings aus. . . . .	153
5.16	Auswertung der Testfahrten zur Vernetzung von Infrastruktur und Fahrzeug mittels ETSI ITS-G5. Die versendeten Nachrichten wurden hierbei nicht verschlüsselt und nicht signiert. . . . .	155
5.17	Absicherung auf virtuell erweiterten Testfeldern. . . . .	157
6.1	Gegenüberstellung von datengetriebenen und modellbasierten Ansätzen. . . . .	165





# Tabellenverzeichnis

2.1	Beispielhafte, verfügbare Datensätze erfasster Verkehrsszenarien. . .	21
2.2	Vergleich verschiedener Testumgebungen. . . . .	36
3.1	Verkehrsumgebungen des hochautomatisierten Fahrens. . . . .	47
4.1	Beispiele der Kategorien eines Verkehrsszenarios. . . . .	67
4.2	Quantitativer Vergleich der Lokalisierungsbestimmung. . . . .	85
4.3	Beispielhafte Parameter S des Kamerasensormodells. . . . .	107
4.4	Intrinsische Parameter S des Lidarsensors. . . . .	108
4.5	Beispielhafte Kalibrierparameter S des Objektsensors. . . . .	109
4.6	Beispielhafte Kalibrierparameter S des Belegtheitsgittersensors. . .	110
4.7	Beispielhafte, bei der Testdurchführung kontinuierlich zu überwachende Rahmenbedingungen. . . . .	121
5.1	Intrinsische und extrinsische Kameraparameter des Versuchsträgers ELLA. . . . .	141



# Eigene Veröffentlichungen

- [Bogdoll et al., 2021] Bogdoll, D., Matalla, P., Füllner, C., Raack, C., Li, S., Käfer, T., Orf, S., Zofka, M. R., Sartoris, F., Schweikert, C., Pfeiffer, T., Richter, A., Randel, S., and Bonk, R. (2021). Kiglis: Smart networks for smart cities. In *2021 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, pages 1–4.
- [Ş. Taş et al., 2018] Ş. Taş, Ö., Salscheider, N. O., Poggenhans, F., Wirges, S., Bändera, C., Zofka, M. R., Strauss, T., Zöllner, J. M., and Stiller, C. (2018). Making Bertha Cooperate—Team AnnieWAY’s Entry to the 2016 Grand Cooperative Driving Challenge. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19(4):1262–1276.
- [Donn et al., 2015] Donn, C., Engler, M., Viehl, A., Valentina, R., Zofka, M. R., Bersiner, L., Cakar, E., Traub, R., Müller, G., and Mühr, B. (2015). Optimized Utilization of E-Vehicle Range Using Route-Based Online Weather Forecast Data. In *24. Aachener Kolloquium Fahrzeug-und Motorentechnik*, Aachen.
- [Fleck et al., 2018] Fleck, T., Daaboul, K., Weber, M., Schörner, P., Wehmer, M., Doll, J., Orf, S., Sußmann, N., Hubschneider, C., Zofka, M. R., Kuhnt, F., Kohlhaas, R., Baumgart, I., Zöllner, R., and Zöllner, J. M. (2018). Towards Large Scale Urban Traffic Reference Data: Smart Infrastructure in the Test Area Autonomous Driving Baden-Württemberg. In *Intelligent Autonomous Systems 15 - Proceedings of the 15th International Conference IAS-15, Baden-Baden, Germany, 11.-15. Juni, 2018*, pages 964–982.
- [Fleck et al., 2022] Fleck, T., Jauernig, L., Polley, R., Schörner, P., Zofka, M. R., and Zöllner, J. M. (2022). Infra2go: A mobile development platform for connected, cooperative and autonomous driving. In *2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, page 1629–1636. IEEE.
- [Fleck et al., 2020] Fleck, T., Ochs, S., Zofka, M. R., and Zöllner, J. M. (2020). Robust tracking of reference trajectories for autonomous driving in intelligent roadside infrastructure. In *2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pages 1337–1342.
- [Fleck et al., 2020] Fleck, T., Zipfl, M., Zofka, M. R., and Gremmelmaier, H. (2020). FZI-Forschungszentrum Informatik Github: Test Area Autonomous Driving Dataset. <https://github.com/fzi-forschungszentrum-informatik/test-area-autonomous-driving-dataset>. Zuletzt zugegriffen am 11.12.2023.

- [Flötteröd et al., 2025] Flötteröd, Y.-P., Münster, M., Brost, M., Ochs, S., Zofka, M. R., Lambauer, K., Schratter, M., and Scheibe, S. (2025). *Novel Vehicle Technologies for Shared Automated Mobility Services with Real-Life Pilots*, pages 3–17. Springer Nature Switzerland, Cham.
- [Gremmelmaier et al., 2022] Gremmelmaier, H., Töttel, L., Pavlitskaya, S., Orf, S., Zofka, M. R., and Zöllner, J. M. (2022). Getting ready for all types of users: A virtual reality training center for automated vehicles. In Ishibuchi, H., Kwoh, C., Tan, A., Srinivasan, D., Miao, C., Trivedi, A., and Crockett, K. A., editors, *IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, SSCI 2022, Singapore, December 4-7, 2022*, pages 77–85. IEEE.
- [Heinrich et al., 2024] Heinrich, M., Zipfl, M., Uecker, M., Ochs, S., Gontscharow, M., Fleck, T., Doll, J., Schörner, P., Hubschneider, C., Zofka, M. R., et al. (2024). CoCar NextGen: a Multi-Purpose Platform for Connected Autonomous Driving Research. *arXiv preprint arXiv:2404.17550*.
- [Klemm et al., 2016] Klemm, S., Essinger, M., Oberländer, J., Zofka, M. R., Kuhnt, F., Weber, M., Kohlhaas, R., Kohs, A., Roennau, A., Schamm, T., and Zöllner, J. M. (2016). Autonomous multi-story navigation for valet parking. In *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pages 1126–1133.
- [Muetsch et al., 2023] Muetsch, F., Gremmelmaier, H., Bogdoll, D., Zofka, M. R., and Zöllner, J. M. (2023). From model-based to data-driven simulation: Challenges and trends in autonomous driving. In *CVPR 2023 Workshop for Vision-Centric Autonomous Driving (VCAD)*.
- [Ochs et al., 2024] Ochs, S., Doll, J., Heinrich, M., Schörner, P., Klemm, S., Zofka, M. R., and Zöllner, J. M. (2024). Leveraging swarm intelligence to drive autonomously: A particle swarm optimization based approach to motion planning. *arXiv preprint arXiv:2404.02644*.
- [Ochs et al., 2023a] Ochs, S., Fleck, T., Orf, S., Schotschneider, A., Gontscharow, M., Polley, R., Zofka, M. R., Viehl, A., Zöllner, J. M., Simon, K., and Frey, M. (2023a). TAF-BW - Real Laboratory as Enabler for Autonomous Driving. In *Mobility 4.0*, volume 2023-01-1909 of *SAE Technical Paper Series*. SAE International.
- [Ochs et al., 2025] Ochs, S., Grimm, D., Doll, J., Heinrich, M., Orf, S., Fleck, T., Nienhüser, D., Nienhüser, M., Koch, A., Schamm, T., Kohlhaas, R., Knoop, S., Biber, P., Fratzke, D., Kammerer, J., Shekhar, R. J., Bäuerlein, C., Kuhnt, F., Schörner, P., Zofka, M. R., and Zöllner, J. M. (2025). Stepping Ahead with Electrified, Connected and Automated Shuttles in the Test Area Autonomous Driving BW. In *2025 IEEE/SICE International Symposium on System Integrations (SII 2025)*. IEEE.
- [Ochs et al., 2023b] Ochs, S., Percin, T., Samuelis, C., Schörner, P., Zofka, M. R., and Zöllner, J. M. (2023b). What can we learn from virtual sensor models for

- self localization and mapping for autonomous mobile systems? In *26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. IEEE.
- [Ochs et al., 2023c] Ochs, S., Schörner, P., Zofka, M. R., and Zöllner, J. M. (2023c). Lidar-slam using semantic information how to deal with dynamic objects? In *2023 20th International Conference on Ubiquitous Robots (UR)*, pages 35–40.
- [Orf et al., 2024] Orf, S., Ochs, S., Doll, J., Schotschneider, A., Heinrich, M., Zofka, M. R., and Zöllner, J. M. (2024). Modular fault diagnosis framework for complex autonomous driving systems. In *2024 IEEE 20th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*, pages 1–8.
- [Österle et al., 2022] Österle, I., Ulrich, C., Herwartz-Polster, S., Sigle, S., Weimer, J., Conzelmann, M., Fleck, T., and Zofka, M. (2022). Benefits and costs of shared, modular automated vehicles for freight and passenger transport: the case of u-shift. *Transportation Planning and Technology*, 45(3):203–225.
- [Rosenberger et al., 2019a] Rosenberger, P., Holder, M., Huch, S., Winner, H., Fleck, T., Zofka, M. R., Zöllner, J. M., D’hondt, T., and Wassermann, B. (2019a). Benchmarking and functional decomposition of automotive lidar sensor models. In *Intelligent Vehicles Symposium 2019*.
- [Rosenberger et al., 2019b] Rosenberger, P., Holder, M., Zofka, M. R., Fleck, T., D’hondt, T., Wassermann, B., and Prstek, J. (2019b). Functional decomposition of lidar sensor systems for model development. In *Validation and Verification of Automated Systems*, pages 135–149. Springer International Publishing.
- [Schwab et al., 2014] Schwab, S., Leichsenring, T., Zofka, M. R., and Bär, T. (2014). Consistent test method for assistance systems. *ATZ Worldwide*, 116(9):38–43.
- [Schörner et al., 2021] Schörner, P., Conzelmann, M., Fleck, T., Zofka, M., and Zöllner, J. M. (2021). Park my car! automated valet parking with different vehicle automation levels by v2x connected smart infrastructure. In *2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, pages 836–843.
- [Schörner et al., 2022] Schörner, P., Conzelmann, M., Fleck, T., and Zofka, M. R. (2022). SmartEPark: Open Access Repository - Projektergebnisse des Forschungsprojekts SmartEPark. [https://github.com/fzi-forschungszentrum-informatik/smartepark-smart\\_electric\\_parking](https://github.com/fzi-forschungszentrum-informatik/smartepark-smart_electric_parking). Zuletzt zugegriffen am 27.02.2024.
- [Stellet et al., 2015] Stellet, J. E., Zofka, M. R., Schumacher, J., Schamm, T., Niewels, F., and Zöllner, J. M. (2015). Testing of advanced driver assistance towards automated driving: A survey and taxonomy on existing approaches and open questions. In *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, pages 1455–1462.
- [Töttel et al., 2021] Töttel, L., Zipfl, M., Bogdoll, D., Zofka, M. R., and Zöllner, J. M. (2021). Reliving the dataset: Combining the visualization of road users’ interactions with scenario reconstruction in virtual reality. In *International Conference on Intelligent Transportation Engineering*, pages 436–454. Springer.

- [Weber et al., 2022] Weber, M., Zofka, M. R., Schulz, P., and Viehl, A. (2022). AI Systems Engineering for Mobility Applications - Data Basis from Real World Laboratories. *ATZ Worldwide*, 124:58–61.
- [Zipfl et al., 2020] Zipfl, M., Fleck, T., Zofka, M. R., and Zöllner, J. M. (2020). From traffic sensor data to semantic traffic descriptions: The test area autonomous driving baden-württemberg dataset (taf-bw dataset). In *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pages 1–7.
- [Zofka et al., 2018a] Zofka, M. R., Essinger, M., Fleck, T., Kohlhaas, R., and Zöllner, J. M. (2018a). The sleepwalker framework: Verification and validation of autonomous vehicles by mixed reality lidar stimulation. In *2018 IEEE International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots (SIMPAR)*, pages 151–157.
- [Zofka et al., 2023] Zofka, M. R., Fleck, T., Schoerner, P., Heinrich, M., and Zöllner, J. M. (2023). Paving the ways for vehicles-in-the-loop: Wireless integration of autonomous vehicles into mixed reality proving grounds and test areas. In *2023 IEEE 26th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems ITSC 2023 (ITSC)*. IEEE.
- [Zofka et al., 2022] Zofka, M. R., Fleck, T., and Zöllner, J. M. (2022). A unified description of proving grounds and test areas for automated and connected vehicles. In *2022 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. IEEE.
- [Zofka et al., 2016a] Zofka, M. R., Klemm, S., Kuhnt, F., Schamm, T., and Zöllner, J. M. (2016a). Testing and validating high level components for automated driving: simulation framework for traffic scenarios. In *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pages 144–150.
- [Zofka et al., 2014a] Zofka, M. R., Kohlhaas, R., Bär, T., Schwab, S., Schamm, T., and Zöllner, J. M. (2014a). Robust, marker-based head tracking for testing cognitive vehicles in the loop. In *Advances in Visual Computing - 10th International Symposium, ISVC 2014, Las Vegas, NV, USA, December 8-10, 2014, Proceedings, Part I*, pages 752–762.
- [Zofka et al., 2014b] Zofka, M. R., Kohlhaas, R., Schamm, T., and Zöllner, J. M. (2014b). Semivirtual simulations for the evaluation of vision-based ADAS. In *2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings, Dearborn, MI, USA, June 8-11, 2014*, pages 121–126. IEEE.
- [Zofka et al., 2015] Zofka, M. R., Kuhnt, F., Kohlhaas, R., Rist, C., Schamm, T., and Zöllner, J. M. (2015). Data-driven simulation and parametrization of traffic scenarios for the development of advanced driver assistance systems. In *2015 18th International Conference on Information Fusion (Fusion)*, pages 1422–1428.
- [Zofka et al., 2016b] Zofka, M. R., Kuhnt, F., Kohlhaas, R., and Zöllner, J. M. (2016b). Simulation framework for the development of autonomous small scale vehicles. In *2016 IEEE International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots (SIMPAR)*, pages 318–324.

- [Zofka et al., 2020] Zofka, M. R., Töttel, L., Zipfl, M., Heinrich, M., Fleck, T., Schulz, P., and Zöllner, J. M. (2020). Pushing ROS towards the Dark Side: A ROS-based Co-Simulation Architecture for Mixed-Reality Test Systems for Autonomous Vehicles. In *2020 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*, pages 204–211.
- [Zofka et al., 2018b] Zofka, M. R., Ulbrich, S., Karl, D., Fleck, T., Kohlhaas, R., Rönnau, A., Dillmann, R., and Zöllner, J. M. (2018b). Traffic participants in the loop: A mixed reality-based interaction testbed for the verification and validation of autonomous vehicles. In *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pages 3583–3590.





# Studentische Arbeiten

- [1] D. Karl, "Interacting with Dynamic Pedestrian Behavior Models through the Means of Telepresence," Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Deutschland, 2017.
- [2] T. Thorn, "Entwicklung eines Modells zur automatischen Generierung von komplexen urbanen Szenarien," Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Deutschland, 2019.
- [3] M. Wieser, "Unüberwachte Extraktion und Persistierung von Fahrzeuginteraktionen anhand von Zeitreihenclustering," Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Deutschland, 2015.
- [4] M. Kosta, "Fusion von Surround-View-Kameradaten mit Laserscannerdaten zur Augmentierung einer Vehicle-in-the-loop Umgebung," Bachelorarbeit, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg, Deutschland, 2015.
- [5] M. Lohr, "Konzeption eines Hardware und Vehicle-in-the-loop Prüfstands für C2X-Anwendungen," Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Deutschland, 2018.
- [6] D. Pietsch, "Datengetriebene Simulation von Verkehrsteilnehmern an einer Kreuzung," Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Deutschland, 2016.
- [7] M. Eckert, "Entwicklung eines Szenarieneditors und einer Gazebo-basierten Verkehrsszenariensimulation," Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Deutschland, 2016.
- [8] F.-J. Siegemund, "Modellbildung und Ansteuerung eines Omnidirektionalen Automobils," Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Deutschland, 2016.
- [9] C. Rist, "Erfassung und Modifikation von Verkehrssituationen aus Laserscanner-Aufzeichnungen," Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Deutschland, 2014.



# Literaturverzeichnis

- [10] Bundesregierung, "Gesetzesentwurf der Bundesregierung - Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes und des Pflichtversicherungsgesetzes – Gesetz zum autonomen Fahren, Bearbeitungsstand: 08.02.2021." [https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/Gesetze/Gesetze-19/gesetz-aenderung-strassenverkehrsgesetz-pflichtversicherungsgesetz-autonomes-fahren.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/Gesetze/Gesetze-19/gesetz-aenderung-strassenverkehrsgesetz-pflichtversicherungsgesetz-autonomes-fahren.pdf?__blob=publicationFile), February 2021. Zuletzt zugegriffen am 04.02.2024.
- [11] Bundesregierung, "Verordnung zur Regelung des Betriebs von Kraftfahrzeugen mit automatisierter und autonomer Fahrfunktion und zur Änderung straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften," 2022. vom 24. Juni 2022 (BGBl. I S. 986).
- [12] "EU Road Safety: Towards Vision Zero," Broschüre, European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency (CINEA), 2022. [https://cinea.ec.europa.eu/publications/eu-road-safety-towards-vision-zero\\_en#files](https://cinea.ec.europa.eu/publications/eu-road-safety-towards-vision-zero_en#files). Zuletzt zugegriffen am 16.12.2024.
- [13] A. Herrmann, W. Brenner, and R. Stadler, *Autonomous Driving: How the Driverless Revolution Will Change the World*. Bingley, UK: Emerald Publishing, 2018.
- [14] Verband der Automobilindustrie e.V., *Automatisierung: Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren*. 2015.
- [15] D. A. Pomerleau, "Alvin: An autonomous land vehicle in a neural network," in *Advances in Neural Information Processing Systems 1* (D. S. Touretzky, ed.), pp. 305–313, Morgan-Kaufmann, 1989.
- [16] M. Maurer, *Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr, München, 2000.
- [17] C. Englund, L. Chen, J. Ploeg, E. Semsar-Kazerooni, A. Voronov, H. H. Bengtsson, and J. Didoff, "The Grand Cooperative Driving Challenge 2016: boosting the introduction of cooperative automated vehicles," *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, pp. 146–152, August 2016.

- [18] J. Ziegler, P. Bender, M. Schreiber, H. Lategahn, T. Strauss, C. Stiller, T. Dang, U. Franke, N. Appenrodt, C. G. Keller, E. Kaus, R. G. Herrtwich, C. Rabe, D. Pfeiffer, F. Lindner, F. Stein, F. Erbs, M.ENZweiler, C. Knöppel, J. Hipp, M. Haueis, M. Trepte, C. Brenk, A. Tamke, M. Ghanaat, M. Braun, A. Joos, H. Fritz, H. Mock, M. Hein, and E. Zeeb, "Making Bertha Drive—An Autonomous Journey on a Historic Route," *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 6, no. 2, pp. 8–20, 2014.
- [19] S. Ulbrich, S. Grossjohann, C. Appelt, K. Homeier, J. Rieken, and M. Maurer, "Structuring cooperative behavior planning implementations for automated driving," in *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp. 2159–2165, Sep. 2015.
- [20] S. Ulbrich and M. Maurer, "Situation assessment in tactical lane change behavior planning for automated vehicles," in *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp. 975–981, Sep. 2015.
- [21] S. Hansen and J.-K. Janssen, "Robobus - Wo und wie autonome Busse jetzt schon fahren," *c't 2018*, vol. 10, pp. 64–69, 2018.
- [22] E. Becic, "Vehicle automation report - ntsb number hwy18mh010," 2019. <https://data.nts.gov/Docket/Document/docBLOB?ID=40477717&FileExtension=.PDF&FileName=Vehicle%20Automation%20Report-Master.PDF>. Zuletzt zugegriffen am 21.02.2025.
- [23] A. Bindman, "Person died after Cruise cars blocked ambulance, SFFD says." <https://www.sfgate.com/bayarea/article/cruise-cars-reportedly-block-first-responders-18343475.php>, Sep 2023. Zuletzt zugegriffen am 04.02.2024.
- [24] T. Kaiser, "Die Todeskreuzung," *Der Stern*, no. 55-59, p. 16, 2022.
- [25] H. Topp, "Automatisch fahren auch in der Stadt - wollen wir das?," *Straßenverkehrstechnik*, no. 5, pp. 345–346, 2023.
- [26] F. Xia, T. Mukherjee, Y. Zhang, and Y.-Q. Song, "Sensor networks for high-confidence cyber-physical systems," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 7, no. 1, p. 245734, 2011.
- [27] M. Wood, P. Robbel, M. Maass, R. D. Tebbens, M. Meijs, M. Harb, J. Reach, K. Robinson, D. Wittmann, M. B. Essayed, S. Liu, Y. Wang, C. Knobel, D. Boymanns, M. Lohning, B. Dehlink, D. Kaule, R. Krüger, J. Frtunikj, F. Raisch, M. Gruber, J. Steck, J. Mejia-Hernandez, S. Syguda, P. Blüher, K. Klonecki, P. Schwarz, T. Wiltshko, S. Pukallus, K. Sedlaczek, N. Garbacik, D. Smerza, D. Li, A. Timmons, M. Belotti, M. O'Brien, M. Schöllhorn, U. Dannebaum, J. Weast, A. Tatourian, B. Dornieden, P. Schnetter, P. Themann, T. Weidner, and P. Schlicht, "Safety First for Automated Driving," White Paper, APTIV, AUDI, Baidu, apollo, BMW, Continental, DAIMLER, FCA, here, infineon, intel,

- VW, 2019. <https://www.daimler.com/documents/innovation/other/safety-first-for-automated-driving.pdf>, Zuletzt zugegriffen am 15.12.2024.
- [28] L. Eckstein and H. Winner, *Testkonzepte für die Absicherung von automatisiertem Fahren*, vol. 2, ch. 46, pp. 1253–1287. Wiesbaden: Springer Vieweg, 4. Auflage ed., Juli 2024.
- [29] W. Wachenfeld and H. Winner, *The New Role of Road Testing for the Safety Validation of Automated Vehicles*, pp. 419–435. Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [30] N. Kalra and S. M. Paddock, “Driving to safety: How many miles of driving would it take to demonstrate autonomous vehicle reliability?,” *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 94, pp. 182–193, 2016.
- [31] M. Paulweber and K. Lebert, *Mess- und Prüfstandstechnik*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [32] T. Düser, *X-in-the-Loop - ein durchgängiges Validierungsframework für die Fahrzeugentwicklung am Beispiel von Antriebsstrangfunktionen und Fahrerassistenzsystemen*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2010.
- [33] H. Stachowiak, *Allgemeine Modelltheorie*. Springer-Verlag, 1973.
- [34] M. Brahmi, K.-H. Siedersberger, A. Siegel, and M. Maurer, “Reference systems for environmental perception: Requirements, validation and metric-based evaluation,” in *6. Tagung Fahrerassistenz*, 2013.
- [35] M. Hoss, M. Scholtes, and L. Eckstein, “A Review of Testing Object-Based Environment Perception for Safe Automated Driving,” *Automotive Innovation*, vol. 5, pp. 223–250, Aug. 2022.
- [36] H. Winner, *Challenges of Automotive Systems Engineering for Industry and Academia*. Springer Berlin, Heidelberg, 2013.
- [37] H. Askaripoor, M. Hashemi Farzaneh, and A. Knoll, “E/e architecture synthesis: Challenges and technologies,” *Electronics*, vol. 11, no. 4, 2022.
- [38] J. Maier and H.-C. Reuss, “Handling system complexity in zonal e/e architectures,” *Transportation Engineering*, vol. 13, p. 100195, 2023.
- [39] M. Bojarski, D. D. Testa, D. Dworakowski, B. Firner, B. Flepp, P. Goyal, L. D. Jackel, M. Monfort, U. Muller, J. Zhang, X. Zhang, J. Zhao, and K. Zieba, “End to end learning for self-driving cars,” *CoRR*, vol. abs/1604.07316, 2016.
- [40] C. Hubschneider, A. Bauer, M. Weber, and J. M. Zöllner, “Adding navigation to the equation: Turning decisions for end-to-end vehicle control,” in *2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 1–8, 2017.

- [41] L. Chen, P. Wu, K. Chitta, B. Jaeger, A. Geiger, and H. Li, “End-to-end autonomous driving: Challenges and frontiers,” *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. PP, 07 2024.
- [42] O. S. Tas, F. Kuhnt, J. M. Zöllner, and C. Stiller, “Functional system architectures towards fully automated driving,” in *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pp. 304–309, June 2016.
- [43] T. Kessler, J. Bernhard, M. Buechel, K. Esterle, P. Hart, D. Malovetz, M. Truong Le, F. Diehl, T. Brunner, and A. Knoll, “Bridging the gap between open source software and vehicle hardware for autonomous driving,” in *2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 1612–1619, June 2019.
- [44] J. Haselberger, M. Pelzer, B. Schick, and S. Müller, “Jupiter – ros based vehicle platform for autonomous driving research,” in *2022 IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments (ROSE)*, pp. 1–8, 2022.
- [45] P. Karle, T. Betz, M. Bosk, F. Fent, N. Gehrke, M. Geisslinger, L. Gressenbuch, P. Hafemann, S. Huber, M. Hübner, S. Huch, G. Kaljavesi, T. Kerbl, D. Kulmer, T. Mascetta, S. Maierhofer, F. Pfab, F. Rezabek, E. Rivera, S. Sagmeister, L. Seidlitz, F. Sauerbeck, I. Tahiraj, R. Trauth, N. Uhlemann, G. Würsching, B. Zarrouki, M. Althoff, J. Betz, K. Bengler, G. Carle, F. Diermeyer, J. Ott, and M. Lienkamp, “EDGAR: An Autonomous Driving Research Platform – From Feature Development to Real-World Application,” 2024.
- [46] A.-M. Hellmund, S. Wirges, O. c. Taş, C. Bandera, and N. O. Salscheider, “Robot operating system: A modular software framework for automated driving,” in *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 1564–1570, 2016.
- [47] M. Quigley, K. Conley, B. P. Gerkey, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, R. Wheeler, and A. Y. Ng, “Ros: an open-source robot operating system,” in *ICRA Workshop on Open Source Software*, 2009.
- [48] Apollo Auto, “Apollo’s GitHub page.” <https://github.com/ApolloAuto/apollo>, 2022. Zuletzt zugegriffen am 21.02.2025.
- [49] S. Kato, E. Takeuchi, Y. Ishiguro, Y. Ninomiya, K. Takeda, and T. Hamada, “An Open Approach to Autonomous Vehicles,” *Micro*, vol. 35, 2015.
- [50] S. Kato, S. Tokunaga, Y. Maruyama, S. Maeda, M. Hirabayashi, Y. Kitsukawa, A. Monrroy, T. Ando, Y. Fujii, and T. Azumi, “Autoware on board: Enabling autonomous vehicles with embedded systems,” in *International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPS)*, 2018.
- [51] Z. Zang, R. Tumu, J. Betz, H. Zheng, and R. Mangharam, “Winning the 3rd japan automotive AI challenge - autonomous racing with the autoware.auto open source software stack,” in *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2022.

- [52] G. Mehr, P. Ghorai, C. Zhang, A. Nayak, D. Patel, S. Sivashangaran, and A. Eskandarian, "X-CAR: An Experimental Vehicle Platform for Connected Autonomy Research Powered by CARMA," *Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2022.
- [53] project-aslan, "ASLAN Autonomy Github page." <https://github.com/project-aslan/Aslan>, 2023. Zuletzt zugegriffen am 21.02.2025.
- [54] M. Mueck and I. Karls, *Networking Vehicles to Everything*. Berlin, Boston: De | G Press, 2018.
- [55] A. Festag, "Standards for vehicular communication—from ieee 802.11p to 5g," *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 132, 09 2015.
- [56] "ETSI EN 302 636-4-1: Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 4: Geographical addressing and forwarding for point-to-point and point-to-multipoint communications; Sub-part 1: Media-Independent Functionality," standard, European Telecommunications Standards Institute (ETSI), Sophia Antipolis, France, Aug. 2017.
- [57] "ETSI EN 302 637-2: Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service," standard, European Telecommunications Standards Institute (ETSI), Sophia Antipolis, France, Aug. 2017.
- [58] "Final Draft ETSI EN 302 637-3: Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service ," standard, European Telecommunications Standards Institute (ETSI), Sophia Antipolis, France, 2014.
- [59] "ETSI TS 103 301 V1.3.1 (2020-02): Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Facilities layer protocols and communication requirements for infrastructure services," standard, European Telecommunications Standards Institute (ETSI), Sophia Antipolis, France, Feb 2020.
- [60] K. Hartmann and M. Grünhäuser, "V2X-Kommunikation in Testfeldern für Autonomes Fahren - Vergleichende Analyse der Services und Nachrichten," *Internationales Verkehrswesen*, vol. 75, 2023.
- [61] R. Molina-Masegosa, J. Gozalvez, and M. Sepulcre, "Comparison of ieee 802.11p and lte-v2x: An evaluation with periodic and aperiodic messages of constant and variable size," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 121526–121548, 2020.
- [62] Schäuuffele, J. and Zurawka, T., *Automotive Software Engineering - Grundlagen, Prozesse, Methoden und Werkzeuge effizient einsetzen*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012.
- [63] IEEE, "610.12-1990 - IEEE standard glossary of software engineering terminology," 1990.

- [64] Meister, S. N. R., *On Creating Reference Data for Performance Analysis in Image Processing: Über die Erzeugung von Referenzdaten zur Performanzanalyse in der Bildverarbeitung*. Dissertation, Ruperto-Carola Universität, Heidelberg.
- [65] R. Schubert, H. Klöden, G. Wanielik, and S. Kälberer, "Performance evaluation of multiple target tracking in the absence of reference data," in *Information Fusion (FUSION), 13<sup>th</sup> Conference on*, pp. 1–7, 2010.
- [66] J. Stellet, T. Brade, A. Poddey, S. Jesenski, and W. Branz, "Formalisation and algorithmic approach to the automated driving validation problem," 06 2019.
- [67] D. A. Weitzel, *Objektive Bewertung der Kontrollierbarkeit nicht situationsgerechter Reaktionen umfeldsensorbasierter Fahrerassistenzsysteme*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2013.
- [68] M. Feilhauer, *Simulationsgestützte Absicherung von Fahrerassistenzsystemen*. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2018.
- [69] W. D. Käßler, *Testing Roadmap: Durchführung, Analyse und Bewertung von Fahrversuchen*, pp. 49–101. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [70] T. Düser, "Verfahren und System zum Erzeugen von Szenariendaten zum Testen eines Fahrerassistenzsystems eines Fahrzeugs," 2022. EU Patent EP4302197A1 - ausstehend, Online-Ressource: <https://patents.google.com/patent/EP4302197A1/de>, zuletzt zugegriffen am 23.12.2024.
- [71] H. Yin and C. Berger, "When to use what data set for your self-driving car algorithm: An overview of publicly available driving datasets," in *2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 1–8, 2017.
- [72] Y. Kang, H. Yin, and C. Berger, "Test your self-driving algorithm: An overview of publicly available driving datasets and virtual testing environments," *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 4, no. 2, pp. 171–185, 2019.
- [73] M. Liu, E. Yurtsever, J. Fossaert, X. Zhou, W. Zimmer, Y. Cui, B. L. Zagar, and A. C. Knoll, "A survey on autonomous driving datasets: Statistics, annotation quality, and a future outlook," *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, pp. 1–29, 2024.
- [74] S. Sarker, B. Maples, and W. Li, "A Comprehensive Review on Traffic Datasets and Simulators for Autonomous Vehicles," *CoRR*, vol. abs/2412.14207, 2024.



- [75] J. Bach, S. Otten, E. Sax, and M. Holzäpfel, "Reactive-replay approach for verification and validation of closed-loop control systems in early development," in *WCX™ 17: SAE World Congress Experience*, SAE International, mar 2017.
- [76] N. Weber, C. Thiem, and U. Konigorski, "A needle in a haystack - how to derive relevant scenarios for testing automated driving systems in urban areas," *CoRR*, vol. abs/2109.03648, 2021.
- [77] W. Wachenfeld and H. Winner, "Virtual Assessment of Automation in Field Operation – A New Runtime Validation Method," in *Workshop Fahrerassistenzsysteme*, 2015.
- [78] C. Wang and H. Winner, "Overcoming challenges of validation automated driving and identification of critical scenarios," in *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, pp. 2639–2644, 2019.
- [79] C. Wang, *Silent Testing for Safety Validation of Automated Driving in Field Operation*. Dissertation, Technische Universität, Darmstadt, 2021.
- [80] A. G. König, *Absicherung hochautomatisierten Fahrens durch passiven virtuellen Dauerlaufstest*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2021.
- [81] R. Krajewski, J. Bock, L. Kloecker, and L. Eckstein, "The highd dataset: A drone dataset of naturalistic vehicle trajectories on german highways for validation of highly automated driving systems," in *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 2118–2125, 2018.
- [82] E. Strigel, D. Meissner, F. Seeliger, B. Wilking, and K. Dietmayer, "The kooper intersection laserscanner and video dataset," in *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 1900–1901, IEEE, 2014.
- [83] W. Zhan, L. Sun, D. Wang, H. Shi, A. Clausse, M. Naumann, J. Kümmerle, H. Königshof, C. Stiller, A. de La Fortelle, and M. Tomizuka, "INTERACTION Dataset: An INTERnational, Adversarial and Cooperative motion Dataset in Interactive Driving Scenarios with Semantic Maps," *arXiv:1910.03088 [cs, eess]*, 2019.
- [84] W. Zimmer, C. Creß, H. T. Nguyen, and A. C. Knoll, "TUMTraf Intersection Dataset: All You Need for Urban 3D Camera-LiDAR Roadside Perception," in *2023 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, IEEE, 2023.
- [85] W. Zimmer, J. Birkner, M. Brucker, H. T. Nguyen, S. Petrovski, B. Wang, and A. C. Knoll, "Infradet3d: Multi-modal 3d object detection based on roadside infrastructure camera and lidar sensors," in *2023 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, IEEE, 2023.

- [86] C. Creß, W. Zimmer, N. Purschke, B. N. Doan, S. Kirchner, V. Lakshminarasimhan, L. Strand, and A. C. Knoll, "TUMTraf Event: Calibration and Fusion Resulting in a Dataset for Roadside Event-Based and RGB Cameras," *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 9, no. 7, pp. 5186 – 5203, 2024.
- [87] P. Sun, H. Kretzschmar, X. Dotiwalla, A. Chouard, V. Patnaik, P. Tsui, J. Guo, Y. Zhou, Y. Chai, B. Caine, V. Vasudevan, W. Han, J. Ngiam, H. Zhao, A. Timofeev, S. Ettinger, M. Krivokon, A. Gao, A. Joshi, Y. Zhang, J. Shlens, Z. Chen, and D. Anguelov, "Scalability in perception for autonomous driving: Waymo open dataset," in *2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 2443–2451, 2020.
- [88] S. Ettinger, S. Cheng, B. Caine, C. Liu, H. Zhao, S. Pradhan, Y. Chai, B. Sapp, C. R. Qi, Y. Zhou, Z. Yang, A. Chouard, P. Sun, J. Ngiam, V. Vasudevan, A. McCauley, J. Shlens, and D. Anguelov, "Large scale interactive motion forecasting for autonomous driving: The waymo open motion dataset," in *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 9710–9719, October 2021.
- [89] K. Chen, R. Ge, H. Qiu, R. Ai-Rfou, C. R. Qi, X. Zhou, Z. Yang, S. Ettinger, P. Sun, Z. Leng, M. Mustafa, I. Bogun, W. Wang, M. Tan, and D. Anguelov, "Womd-lidar: Raw sensor dataset benchmark for motion forecasting," *arXiv preprint arXiv:2304.03834*, April 2023.
- [90] H. Caesar, V. Bankiti, A. H. Lang, S. Vora, V. E. Liong, Q. Xu, A. Krishnan, Y. Pan, G. Baldan, and O. Beijbom, "nusenes: A multimodal dataset for autonomous driving," *arXiv preprint arXiv:1903.11027*, 2019.
- [91] T. Chen, T. Jing, R. Tian, Y. Chen, J. Domeyer, H. Toyoda, R. Sherony, and Z. Ding, "Psi: A pedestrian behavior dataset for socially intelligent autonomous car," *arXiv preprint arXiv:2112.02604*, 2021.
- [92] T. Jing, H. Xia, R. Tian, H. Ding, X. Luo, J. Domeyer, R. Sherony, and Z. Ding, "Inaction: Interpretable action decision making for autonomous driving," in *European Conference on Computer Vision*, pp. 370–387, Springer, 2022.
- [93] H. Yu, Y. Luo, M. Shu, Y. Huo, Z. Yang, Y. Shi, Z. Guo, H. Li, X. Hu, J. Yuan, and Z. Nie, "Dair-v2x: A large-scale dataset for vehicle-infrastructure cooperative 3d object detection," in *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 21361–21370, 2022.
- [94] H. Yu, W. Yang, H. Ruan, Z. Yang, Y. Tang, X. Gao, X. Hao, Y. Shi, Y. Pan, N. Sun, J. Song, J. Yuan, P. Luo, and Z. Nie, "V2x-seq: A large-scale sequential dataset for vehicle-infrastructure cooperative perception and forecasting," in *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2023.
- [95] F. Fent, F. Kuttnerreich, F. Ruch, F. Rizwin, S. Juergens, L. Lechermann, C. Nissler, A. Perl, U. Voll, M. Yan, and M. Lienkamp, "Man truckscenes:

- A multimodal dataset for autonomous trucking in diverse conditions," *arXiv preprint arXiv:2407.07462*, 2024.
- [96] C. Schick Tanz, L. Klitzke, K. Gimm, S. Knake-Langhorst, G. Rizzo, H. H. Mosebach, and K. Liesner, "DLR Urban Traffic dataset (DLR UT)." <https://zenodo.org/records/14773161>, 2024. Zuletzt zugegriffen am 21.02.2025.
  - [97] S. Knake-Langhorst, K. Gimm, T. Frankiewicz, and F. Köster, "Test Site AIM – Toolbox and Enabler for Applied Research and Development in Traffic and Mobility," *Transportation Research Procedia*, vol. 14, pp. 2197–2206, 2016. Transport Research Arena TRA2016.
  - [98] C. Schick Tanz, L. Klitzke, K. Gimm, R. Lüdtke, H. H. Mosebach, K. Liesner, A. Wodtke, and L. Asbach, "DLR Highway Traffic dataset (DLR HT)." <https://zenodo.org/records/14811064>, 2024. Zuletzt zugegriffen am 21.02.2025.
  - [99] E. Sax, "Bedeutung des Testens in der Automobilindustrie," in *Automatisiertes Testen Eingebetteter Systeme in der Automobilindustrie* (E. Sax, ed.), ch. 1, pp. 1–11, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2008.
  - [100] M. Maurer, *Automotive Systems Engineering: A Personal Perspective*, pp. 17–35. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
  - [101] S. Hakuli and M. Krug, "Virtuelle integration," in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, and C. Singer, eds.), pp. 125–138, Springer, 2015.
  - [102] S. Siegl and T. Düser, "Verification and validation (v&v) for safe deployment of automated driving systems – in depth evaluation of state-of-the-art v&v methods in the automotive sector," in *2024 IEEE International Workshop on Metrology for Automotive (MetroAutomotive)*, pp. 64–69, 2024.
  - [103] IPG Automotive GmbH, "Steering-in-the-loop Test Bench." [https://ipg-automotive.com/fileadmin/data/know-how/media\\_library/pdf/IPG\\_Automotive\\_Steering-in-the-Loop\\_Test\\_Bench\\_EN.pdf](https://ipg-automotive.com/fileadmin/data/know-how/media_library/pdf/IPG_Automotive_Steering-in-the-Loop_Test_Bench_EN.pdf), 2018. Zuletzt zugegriffen am 13.02.2024.
  - [104] S. Riedmaier, J. Nesensohn, C. Gutenkunst, T. Düser, B. Schick, and H. Abdellatif, "Validation of X-in-the-Loop Approaches for Virtual Homologation of Automated Driving Functions," in *GSVF Symposium 2018, Graz*, 2018.
  - [105] M. Schwammberger, "An abstract model for proving safety of autonomous urban traffic," *Theoretical Computer Science*, vol. 744, pp. 143–169, 2018. Theoretical aspects of computing.
  - [106] S. Shalev-Shwartz, S. Shammah, and A. Shashua, "On a formal model of safe and scalable self-driving cars," *CoRR*, vol. abs/1708.06374, 2017.

- [107] P. Koopman, B. Osyk, and J. Weast, "Autonomous vehicles meet the physical world: Rss, variability, uncertainty, and proving safety," in *Computer Safety, Reliability, and Security* (A. Romanovsky, E. Troubitsyna, and F. Bitsch, eds.), (Cham), pp. 245–253, Springer International Publishing, 2019.
- [108] S. Kalisvaart, Z. Slavik, and O. Op den Camp, *Using Scenarios in Safety Validation of Automated Systems*, pp. 27–44. Cham: Springer International Publishing, 2020.
- [109] R. Ruhdorfer, B. Willenborg, and M. Sindram, "Coupling of traffic simulations and semantic 3d city models," *gis.Science*, no. 3/2018, 2018.
- [110] S. Geyer, M. Baltzer, B. Franz, S. Hakuli, M. Kauer, M. Kienle, S. Meier, T. Weißgerber, K. Bengler, R. Bruder, F. Flemisch, and H. Winner, "Concept and development of a unified ontology for generating test and use-case catalogues for assisted and automated vehicle guidance," *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 8, no. 3, pp. 183–189, 2014.
- [111] S. Ulbrich, T. Menzel, A. Reschka, F. Schuldt, and M. Maurer, "Definition der Begriffe Szene, Situation und Szenario für das automatisierte Fahren," in *Workshop Fahrerassistenzsysteme*, 2015.
- [112] F. Schuldt, *Ein Beitrag für den methodischen Test von automatisierten Fahrfunktionen mit Hilfe von virtuellen Umgebungen*. Dissertation, Technische Universität, Braunschweig, Apr 2017.
- [113] G. Bagschik, T. Menzel, and M. Maurer, "Ontology based scene creation for the development of automated vehicles," in *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pp. 1813–1820, June 2018.
- [114] J. Sauerbier, J. Bock, H. Weber, and L. Eckstein, "Definition von Szenarien zur Absicherung automatisierter Fahrfunktionen," *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, vol. 121, pp. 42–45, Jan 2019.
- [115] M. Scholtes, L. Westhofen, L. R. Turner, K. Lotto, M. Schuldes, H. Weber, N. Wagener, C. Neurohr, M. H. Bollmann, F. Körtke, J. Hiller, M. Hoss, J. Bock, and L. Eckstein, "6-layer model for a structured description and categorization of urban traffic and environment," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 59131–59147, 2021.
- [116] T. Menzel, G. Bagschik, and M. Maurer, "Scenarios for development, test and validation of automated vehicles," in *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pp. 1821–1827, 2018.
- [117] Association for Standardization of Automation and Measuring Systems (ASAM e.V.), "ASAM SIM:Guide - Standardization for Highly Automated Driving," technischer bericht, ASAM e.V. <https://www.asam.net/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=4297&token=cbeec18c4770d0ff88e3d3c539c13a32abed6300>. Zuletzt zugegriffen am 21.02.2025.

- [118] P. Bender, J. Ziegler, and C. Stiller, "Lanelets: Efficient map representation for autonomous driving," in *2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings*, pp. 420–425, 2014.
- [119] F. Poggenhans, J. Pauls, J. Janosovits, S. Orf, M. Naumann, F. Kuhnt, and M. Mayr, "Lanelet2: A high-definition map framework for the future of automated driving," in *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 1672–1679, Nov 2018.
- [120] B. Schwab and T. H. Kolbe, "Requirement analysis of 3d road space models for automated driving," *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. IV-4/W8, pp. 99–106, 2019.
- [121] C. Berger, "Design considerations for a cyber-physical testing language on the example of autonomous driving," in *Proceedings of the 2012 Workshop on Domain-Specific Modeling, DSM '12*, (New York, NY, USA), p. 49–54, Association for Computing Machinery, 2012.
- [122] R. Queiroz, T. Berger, and K. Czarnecki, "GeoScenario: An Open DSL for Autonomous Driving Scenario Representation," in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, (Paris), IEEE, 2019.
- [123] D. J. Fremont, T. Dreossi, S. Ghosh, X. Yue, A. L. Sangiovanni-Vincentelli, and S. A. Seshia, "Scenic: A language for scenario specification and scene generation," in *Proceedings of the 40th ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation, PLDI 2019*, (New York, NY, USA), p. 63–78, Association for Computing Machinery, 2019.
- [124] D. J. Fremont, K. Edward, T. Dreossi, S. Ghosh, X. Yue, A. L. Sangiovanni-Vincentelli, and S. A. Seshia, "Scenic: a language for scenario specification and data generation," *Machine Learning*, 2022.
- [125] W. Damm, S. Kemper, E. Möhlmann, T. Peikenkamp, and A. Rakow, "Using Traffic Sequence Charts for the Development of HAVs," in *European Congress on Embedded Real Time Software and Systems 2018*, 9th European Congress on Embedded Real Time Software and Systems (ERTS 2018), 2018.
- [126] T. Düser, D. Fischer, and J. Freyer, "A study on the paradigm shift in the validation of automated vehicles," in *2023 IEEE International Automated Vehicle Validation Conference (IAVVC)*, pp. 1–6, 2023.
- [127] A. Diewald, C. Kurz, P. V. Kannan, M. Gießler, M. Pauli, B. Göttel, T. Kayser, F. Gauterin, and T. Zwick, "Radar target simulation for vehicle-in-the-loop testing," *Vehicles*, vol. 3, no. 2, pp. 257–271, 2021.
- [128] P. Pathrose, *ADAS and Automated Driving: A Practical Approach to Verification and Validation*. Warrendale, Pennsylvania, USA: SAE International, 2022.
- [129] N. Hartmann, "Test Automatisierung im Labor," in *Automatisiertes Testen Eingebetteter Systeme in der Automobilindustrie* (E. Sax, ed.), ch. 1, pp. 61–84, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2008.

- [130] R. Pfeffer, *Szenariobasierte simulationsgestützte funktionale Absicherung hoch-automatisierter Fahrfunktionen durch Nutzung von Realdaten*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2020.
- [131] H.-P. Schöner and B. Morys, “Dynamische Fahr simulatoren,” in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, and C. Singer, eds.), pp. 139–154, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [132] H. Feld, B. Mirbach, J. Katrolia, M. Selim, O. Wasenmüller, and D. Stricker, “DFKI Cabin Simulator: A Test Platform for Visual In-Cabin Monitoring Functions,” in *Commercial Vehicle Technology 2020/2021* (K. Berns, K. Dressler, R. Kalmar, N. Stephan, R. Teutsch, and M. Thul, eds.), (Wiesbaden), pp. 417–430, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021.
- [133] M. Fischer, G. Temme, K. Gröne, M. Rehm, and D. Martinez Garcia, “Human-in-the-loop simulator studies as a tool to design and validate interactive communication between automated vehicles and vulnerable road users,” in *8th Symposium Driving Simulation*, November 2022.
- [134] D. J. Verburg, A. C. Van der Knaap, and J. Ploeg, “Vehil: developing and testing intelligent vehicles,” in *Intelligent Vehicle Symposium, 2002. IEEE*, vol. 2, pp. 537–544, IEEE, 2002.
- [135] O. Gietelink, J. Ploeg, B. De Schutter, and M. Verhaegen, “VEHIL: A test facility for validation of fault management systems for advanced driver assistance systems,” in *Proceedings of the 1st IFAC Symposium on Advances in Automotive Control*, (Salerno, Italy), pp. 410–415, Apr. 2004.
- [136] G. Berg and B. Färber, “Vehicle in the loop,” in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, and C. Singer, eds.), pp. 155–163, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [137] M. Gadringer, H. Schreiber, A. Gruber, M. Vorderderfler, D. Amschl, W. Bösch, S. Metzner, H. Pfluegl, and M. Paulweber, “Virtual reality for automotive radars,” *e & i - Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 135, 06 2018.
- [138] T. Bock, M. Maurer, and G. Farber, “Validation of the Vehicle in the Loop (VIL); A milestone for the simulation of driver assistance systems,” *2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 612 – 617, 07 2007.
- [139] T. Bock, *Vehicle in the loop: Test- und Simulationsumgebung für Fahrerassistenzsysteme*. Dissertation, Technische Universität, München, 2008.
- [140] F. Rüger, *Kontrollierbarkeit von Notfall-Fahrerassistenz-systemen in frühen Entwicklungsphasen mit der „VIL-Methode“*. Dissertation, Universität der Bundeswehr, München, 2016.

- [141] G. Berg, *Das Vehicle in the Loop: Ein Werkzeug für die Entwicklung und Evaluation von sicherheitskritischen Fahrerassistenzsystemen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr, München, 2014.
- [142] C. Park, S. Chung, and H. Lee, “Vehicle-in-the-loop in global coordinates for advanced driver assistance system,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 8, 2020.
- [143] T. Genevois, J.-B. Horel, A. Renzaglia, and C. Laugier, “Augmented reality on lidar data: Going beyond vehicle-in-the-loop for automotive software validation,” in *2022 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pp. 971–976, 2022.
- [144] J. Schindler, R. Dariani, M. Rondinone, and T. Walter, “Implementation and testing of dynamic and flexible platoons in urban areas,” in *AAET 2019 – Automatisiertes und vernetztes Fahren*, Februar 2019.
- [145] F.-Y. Wang, X. Wang, L. Li, and P. Mirchandani, “Creating a digital-vehicle proving ground,” *IEEE Intelligent Systems*, vol. 18, pp. 12–15, March 2003.
- [146] H.-P. Schoener and W. Hurich, *Testen mit koordinierten automatisierten Fahrzeugen*, pp. 207 – 219. 03 2024.
- [147] “Passenger cars — Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part I: Double lane-change,” Standard ISO 3888-1:2018, International Organization for Standardization, Geneva, CH, 2018.
- [148] P. Seiniger and A. Weitzel, “Testverfahren für Verbraucherschutz und Gesetzgebung,” in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, and C. Singer, eds.), pp. 167–182, Springer, 2024.
- [149] EuroNCAP, “Test protocol – aeb car-to-car systems,” tech. rep., EuroNCAP, Februar 2024.
- [150] EuroNCAP, “Pedestrian testing protocol - version 8.4,” tech. rep., EuroNCAP, Novembre 2017.
- [151] P. Lemmen, J. Stoll, U. Bergelt, P. Seiniger, M. Wisch, O. Bartels, E. Schubert, M. Kunert, I. Knight, D. Brookes, *et al.*, “Evaluation of pedestrian targets for use in autonomous emergency brake system testing-a report from the harmonisation platform 2 dealing with test equipment,”
- [152] I. Doric, D. Arp, S. Werr, and H.-P. Schöner, “Test System for Safe Automated Driving,” *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift*, vol. 121, pp. 58–63, 01 2019.
- [153] I. Doric and W. Ritter, “Wassersprühsystem zur Erzeugung eines Sprühnebels für die Erprobung von Fahrerassistenzsystemen und Prüfkörper mit einem Wassersprühsystem. Patent: DE 10 2019 131 642 A1,” 2019.

- [154] N. Katzorke, C. Vinçon, P. Kolar, and H. Lasi, "Fields of interest and demands for a digital proving ground twin," *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, vol. 18, p. 100782, 2023.
- [155] N. Katzorke, "Toward prioritization of test infrastructure investments for proving grounds to test cavs," in *2022 International Conference on Connected Vehicle and Expo (ICCVE)*, pp. 1–2, 2022.
- [156] R. Chen, M. Arief, and D. Zhao, "An „Xcity“ Optimization Approach to Designing Proving Grounds for Connected and Autonomous Vehicles." <https://arxiv.org/abs/1808.03089>, 2018. Zuletzt zugegriffen am 21.02.2025.
- [157] R. Chen, M. Arief, W. Zhang, and D. Zhao, "How to evaluate proving grounds for self-driving? a quantitative approach," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 9, pp. 5737–5748, 2021.
- [158] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMDV), "Übersicht zu Digitalen Testfelder für das automatisierte und vernetzte Fahren im Realverkehr in Deutschland." [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/Digitales/uebersicht-digitale-testfelder-avf-bmvi.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/Digitales/uebersicht-digitale-testfelder-avf-bmvi.pdf?__blob=publicationFile), September 2020. Zuletzt zugegriffen am 10.05.2023.
- [159] M. Rehme, S. Richter, and U. Götze, *Szenariogestütztes Life Cycle Costing für urbane Vehicle-to-X-Infrastrukturen*, pp. 437–462. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019.
- [160] A. Adesiyun, I. Erdelean, A. Hedhli, M. Lamb, W. Ponweiser, N. Strand, and E. Zofka, "Overview of connected and automated driving test sites," in *Proceedings of 8th Transport Research Arena TRA 2020* (tba, ed.), TRA, Apr. 2020.
- [161] I. Erdelean, A. Hedhli, M. Lamb, N. Strand, and E. Zofka, "Catalogue of connected and automated driving test sites : Deliverable no2.1," Tech. Rep. 2.1, Driver and vehicle, 2019.
- [162] K. Scharnigg and J. Schappacher, "Testfeldmonitoring - Monitoring von Testfeldaktivitäten zum automatisierten und vernetzten Fahren in Deutschland," tech. rep., Bundesanstalt für Straßenwesen (Bast), 08 2021.
- [163] C. Creß, Z. Bing, and A. C. Knoll, "Intelligent transportation systems using roadside infrastructure: A literature survey," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 25, no. 7, pp. 6309–6327, 2024.
- [164] C. Creß, W. Zimmer, L. Strand, M. Fortkord, S. Dai, V. Lakshminarasimhan, and A. Knoll, "A9-dataset: Multi-sensor infrastructure-based dataset for mobility research," in *33rd IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2022.



- [165] M. Hetzel, H. Reichert, K. Doll, and B. Sick, "Smart infrastructure: A research junction," in *2021 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, IEEE, sep 2021.
- [166] A. Jandial, P. Merdrignac, O. Shagdar, and L. Fevrier, "Implementation and evaluation of intelligent roadside infrastructure for automated vehicle with i2v communication," in *Vehicular Ad-hoc Networks for Smart Cities . Third, International Workshop 2019, Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, 2020.
- [167] P. Glauner, A. Blumenstock, and M. Haueis, "Effiziente Felderprobung von Fahrerassistenzsystemen," in *8. Workshop Fahrerassistenzsysteme*, pp. 5–14, 2012.
- [168] A. Broggi, M. Buzzoni, S. Debattisti, P. Grisleri, M. C. Laghi, P. Medici, and P. Versari, "Extensive tests of autonomous driving technologies," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 14, no. 3, pp. 1403–1415, 2013.
- [169] A. Ohnsman, "FORBES - Waymo Taps Phoenix For A Big Public Test Of Google Self-Driving Car Tech." <https://www.forbes.com/sites/alanohnsman/2017/04/25/waymo-taps-phoenix-for-a-big-public-test-of-google-self-driving-car-tech/?sh=9c5b29b61415>. Zuletzt zugegriffen am 22.02.2025.
- [170] B. Reimer, "FORBES - Elon Musk And The Tesla Automation Strategy: A Disruptor In Vehicle Safety Or Not?," April 2019. <https://www.forbes.com/sites/bryanreimer/2019/04/28/elon-musk-and-the-tesla-automation-strategy-a-disruptor-in-vehicle-safety-or-not/>. Zuletzt zugegriffen am 03.01.2025.
- [171] B. Strasser, *Vernetzung von Test- und Simulationsmethoden für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen*. Dissertation, Technische Universität, München, 2012.
- [172] J. Nilsson, *Computational Verification Methods for Automotive Safety Systems*. Dissertation, Department of Signals and Systems, Chalmers University of Technology, 2014. ISBN: 978-91-7385-973-8.
- [173] P. Koopman and M. Wagner, "Toward a framework for highly automated vehicle safety validation," in *WCX World Congress Experience*, SAE International, apr 2018.
- [174] R. Freedman, "Testability of software components," *IEEE Transactions on Software Engineering*, vol. 17, no. 6, pp. 553–564, 1991.
- [175] VDI-Verein deutscher Ingenieure (VDI e.V.), "VDI-Richtlinie 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen," 2013. Düsseldorf.

- [176] J. Dallmeyer, *Simulation des Straßenverkehrs in der Großstadt*. Springer Vieweg, 01 2014.
- [177] J. Bach, *Methoden und Ansätze für die Entwicklung und den Test prädiktiver Fahrzeugregelungsfunktionen*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2018.
- [178] K. von Neumann-Cosel, *Virtual Test Drive*. Dissertation, Technische Universität, München, 2014.
- [179] J. Fadaie, "The State of Modeling, Simulation, and Data Utilization within Industry: An Autonomous Vehicles Perspective," 2019. <http://arxiv.org/abs/1910.06075>, zuletzt zugegriffen am 17.02.2024.
- [180] P. Kaur, S. Taghavi, Z. Tian, and W. Shi, "A survey on simulators for testing self-driving cars," in *2021 Fourth International Conference on Connected and Autonomous Driving (MetroCAD)*, pp. 62–70, 2021.
- [181] G. Yang, Y. Xue, L. Meng, P. Wang, Y. Shi, Q. Yang, and Q. Dong, "Survey on autonomous vehicle simulation platforms," in *2021 8th International Conference on Dependable Systems and Their Applications (DSA)*, pp. 692–699, 2021.
- [182] H. Alghodhaifi and S. Lakshmanan, "Autonomous vehicle evaluation: A comprehensive survey on modeling and simulation approaches," *IEEE Access*, vol. PP, pp. 1–1, 11 2021.
- [183] J. Zhou, Y. Zhang, S. Guo, and Y. Guo, "A survey on autonomous driving system simulators," in *2022 IEEE International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops (ISSREW)*, pp. 301–306, 2022.
- [184] A. Dosovitskiy, G. Ros, F. Codevilla, A. Lopez, and V. Koltun, "CARLA: An open urban driving simulator," in *Proceedings of the 1st Annual Conference on Robot Learning*, pp. 1–16, 2017.
- [185] S. Shah, D. Dey, C. Lovett, and A. Kapoor, "Airsim: High-fidelity visual and physical simulation for autonomous vehicles," in *Field and Service Robotics*, 2017.
- [186] C. L. Azevedo, N. M. Deshmukh, B. Marimuthu, S. Oh, K. Marczuk, H. Soh, K. Basak, T. Toledo, L.-S. Peh, and M. E. Ben-Akiva, "SimMobility Short-Term: An Integrated Microscopic Mobility Simulator," *Transportation Research Record*, vol. 2622, no. 1, pp. 13–23, 2017.
- [187] P. A. Lopez, M. Behrisch, L. Bieker-Walz, J. Erdmann, Y.-P. Flötteröd, R. Hilbrich, L. Lücken, J. Rummel, P. Wagner, and E. Wießner, "Microscopic traffic simulation using sumo," in *The 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, 2018.

- [188] G. Rong, B. H. Shin, H. Tabatabaee, Q. Lu, S. Lemke, M. Možeiko, E. Boise, G. Uhm, M. Gerow, S. Mehta, E. Agafonov, T. H. Kim, E. Sterner, K. Ushiroda, M. Reyes, D. Zelenkovsky, and S. Kim, "LGSVL Simulator: A High Fidelity Simulator for Autonomous Driving," in *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, p. 1–6, IEEE Press, 2020.
- [189] N. Koenig and A. Howard, "Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (Sendai, Japan), pp. 2149–2154, Sep 2004.
- [190] M. Fellendorf, M. Friedrich, and P. Vortisch, "Kopplung makroskopischer und mikroskopischer Verkehrsmodelle - ein Verfahren für die Integration von großräumiger Planung und Detailplanung," in *Tagungsband der 18. Verkehrswissenschaftlichen Tage*, (Dresden), 2001.
- [191] M. Treiber, A. Hennecke, and D. Helbing, "Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations," *Physical Review E*, vol. 62, p. 1805–1824, Aug. 2000.
- [192] D. Salles, S. Kaufmann, and H.-C. Reuss, "Extending the intelligent driver model in sumo and verifying the drive off trajectories with aerial measurements," *SUMO Conference Proceedings*, vol. 1, p. 1–25, Jul. 2022.
- [193] K. Teknomo, Y. Takeyama, and H. Inamura, "Review on Microscopic Pedestrian Simulation Model," in *Proceedings Japan Society of Civil Engineering Conference*, März 2000. Online verfügbar unter: <https://arxiv.org/abs/1609.01808>. Zuletzt zugegriffen: 27.01.2025.
- [194] S. Curtis, A. Best, and D. Manocha, "Menge: A modular framework for simulating crowd movement," *Collective Dynamics*, vol. 1, pp. 1–40, 2016.
- [195] Q. Li, Z. Peng, Q. Zhang, C. Qiu, C. Liu, and B. Zhou, "Improving the Generalization of End-to-End Driving through Procedural Generation," *arXiv preprint arXiv:2012.13681*, 2020.
- [196] K. Reinhard, W. Raoul, W. Michael, and H. Stefan, "Streetgan: Towards Road Network Synthesis with Generative Adversarial Networks," in *International Conference on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision*, 2017.
- [197] A. Amini, I. Gilitschenski, J. Phillips, J. Moseyko, R. Banerjee, S. Karaman, and D. Rus, "Learning robust control policies for end-to-end autonomous driving from data-driven simulation," *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020.
- [198] A. Amini, T.-H. Wang, I. Gilitschenski, W. Schwarting, Z. Liu, S. Han, S. Karaman, and D. Rus, "Vista 2.0: An open, data-driven simulator for multimodal sensing and policy learning for autonomous vehicles," in *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, 2022.

- [199] R. Martin-Brualla, N. Radwan, M. S. M. Sajjadi, J. T. Barron, A. Dosovitskiy, and D. Duckworth, “Nerf in the wild: Neural radiance fields for untrained photo collections,” *CoRR*, vol. abs/2008.02268, 2020.
- [200] B. Mildenhall, P. P. Srinivasan, M. Tancik, J. T. Barron, R. Ramamoorthi, and R. Ng, “Nerf: Representing scenes as neural radiance fields for view synthesis,” *CoRR*, vol. abs/2003.08934, 2020.
- [201] Y. Xiangli, L. Xu, X. Pan, N. Zhao, A. Rao, C. Theobalt, B. Dai, and D. Lin, “Bungeenerf: Progressive neural radiance field for extreme multi-scale scene rendering,” in *The European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 2022.
- [202] M. Tancik, V. Casser, X. Yan, S. Pradhan, B. P. Mildenhall, P. Srinivasan, J. T. Barron, and H. Kretzschmar, “Block-nerf: Scalable large scene neural view synthesis,” in *2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, (Los Alamitos, CA, USA), pp. 8238–8248, IEEE Computer Society, jun 2022.
- [203] S. W. Kim, J. Phillion, A. Torralba, and S. Fidler, “DriveGAN: Towards a Controllable High-Quality Neural Simulation,” in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Jun. 2021.
- [204] WAYVE, “Ghost Gym: A Neural Simulator for Autonomous Driving.” <https://wayve.ai/thinking/ghost-gym-neural-simulator/>, 2023. Zuletzt zugegriffen am 22.02.2025.
- [205] J. Devaranjan, A. Kar, and S. Fidler, “Meta-Sim2: Unsupervised Learning of Scene Structure for Synthetic Data Generation,” in *Computer Vision – ECCV 2020: 16th European Conference, Glasgow, UK, August 23–28, 2020, Proceedings, Part XVII*, (Berlin, Heidelberg), p. 715–733, Springer-Verlag, 2020.
- [206] A. Prakash, S. Debnath, J.-F. Lafleche, E. Cameracci, G. State, S. Birchfield, and M. T. Law, “Self-supervised real-to-sim scene generation,” *2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 16024–16034, 2020.
- [207] S. Tan, K. Wong, S. Wang, S. Manivasagam, M. Ren, and R. Urtasun, “Scenegen: Learning to generate realistic traffic scenes,” in *2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 892–901, 2021.
- [208] J. Gao, T. Shen, Z. Wang, W. Chen, K. Yin, D. Li, O. Litany, Z. Gojcic, and S. Fidler, “Get3d: A generative model of high quality 3d textured shapes learned from images,” in *Advances In Neural Information Processing Systems*, 2022.
- [209] C.-H. Lin, J. Gao, L. Tang, T. Takikawa, X. Zeng, X. Huang, K. Kreis, S. Fidler, M.-Y. Liu, and T.-Y. Lin, “Magic3d: High-resolution text-to-3d content creation,” in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2023.

- [210] W. Ding, C. Xu, M. Arief, H. ming Lin, B. Li, and D. Zhao, "A survey on safety-critical driving scenario generation - a methodological perspective," *ArXiv*, vol. abs/2202.02215, 2022.
- [211] L. Feng, Q. Li, Z. Peng, S. Tan, and B. Zhou, "TrafficGen: learning to generate diverse and realistic traffic scenarios," *arXiv preprint arXiv:2210.06609*, 2022.
- [212] M. Klischat and M. Althoff, "Generating critical test scenarios for automated vehicles with evolutionary algorithms," in *2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pp. 2352–2358, 2019.
- [213] J. Wang, A. Pun, J. Tu, S. Manivasagam, A. Sadat, S. Casas, M. Ren, and R. Urtasun, "Advsim: Generating safety-critical scenarios for self-driving vehicles," *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2021.
- [214] D. Rempe, J. Philion, L. J. Guibas, S. Fidler, and O. Litany, "Generating useful accident-prone driving scenarios via a learned traffic prior," in *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2022.
- [215] Y. Wang, T. Zhao, and F. Yi, "Multiverse Transformer: 1st Place Solution for Waymo Open Sim Agents Challenge 2023." <https://arxiv.org/abs/2306.11868>, 2023. Zuletzt zugegriffen am 22.02.2025.
- [216] L. Fonseca Alexandre de Oliveira, L. Schories, L. Brostek, and M. Meywerk, "Simulation-based evaluation of a generic autonomous emergency braking system using a cognitive pedestrian behavior model," in *27th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, 04 2023.
- [217] L. Brostek, C. Rössert, J. Drever, and A. Knorr, "Achieving realism in traffic simulations: Performance of a cognitive behavior model on the waymo open sim agent challenge." [https://cognibit.de/wp-content/uploads/2024/06/Achieving\\_Realism\\_in\\_Traffic\\_Simulations-whitepaper.pdf](https://cognibit.de/wp-content/uploads/2024/06/Achieving_Realism_in_Traffic_Simulations-whitepaper.pdf), Juni 2024. zuletzt zugegriffen: 11.01.2025.
- [218] C. Gulino, J. Fu, W. Luo, G. Tucker, E. Bronstein, Y. Lu, J. Harb, X. Pan, Y. Wang, X. Chen, J. Co-Reyes, R. Agarwal, R. Roelofs, Y. Lu, N. Montali, P. Mougin, Z. Yang, B. White, A. Faust, R. McAllister, D. Anguelov, and B. Sapp, "Waymax: An accelerated, data-driven simulator for large-scale autonomous driving research," in *Advances in Neural Information Processing Systems* (A. Oh, T. Naumann, A. Globerson, K. Saenko, M. Hardt, and S. Levine, eds.), vol. 36, pp. 7730–7742, Curran Associates, Inc., 2023.
- [219] N. Montali, J. Lambert, P. Mougin, A. Kuefler, N. Rhinehart, M. Li, C. Gulino, T. Emrich, Z. Yang, S. Whiteson, B. White, and D. Anguelov, "The waymo open sim agents challenge," in *Proceedings of the 37th International Conference on Neural Information Processing Systems, NIPS '23*, (Red Hook, NY, USA), Curran Associates Inc., 2024.

- [220] T. A. Wheeler, M. Holder, H. Winner, and M. J. Kochenderfer, “Deep stochastic radar models,” in *2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pp. 47–53, 2017.
- [221] K.-C. Chang, R. Wang, H.-J. Lin, Y.-L. Liu, C.-P. Chen, Y.-L. Chang, and H.-T. Chen, “Learning camera-aware noise models,” *Proceedings of European Conference on Computer vision (ECCV)*, 08 2020.
- [222] Z. Yang, Y. Chai, D. Anguelov, Y. Zhou, P. Sun, D. Erhan, S. Rafferty, and H. Kretzschmar, “Surfelgan: Synthesizing realistic sensor data for autonomous driving,” in *2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 11115–11124, 2020.
- [223] S. Manivasagam, S. Wang, K. Wong, W. Zeng, M. Sazanovich, S. Tan, B. Yang, W.-C. Ma, and R. Urtasun, “Lidarsim: Realistic lidar simulation by leveraging the real world,” pp. 11164–11173, 06 2020.
- [224] A. Blattmann, R. Rombach, H. Ling, T. Dockhorn, S. W. Kim, S. Fidler, and K. Kreis, “Align your latents: High-resolution video synthesis with latent diffusion models,” 2023.
- [225] M. Geimer, T. Krüger, and Linsel. P., “Co-Simulation, gekoppelte Simulation oder Simulatorkopplung? Ein Versuch der Begriffsvereinheitlichung,” *O+P Ölhydraulik und Pneumatik*, vol. 50, no. 11-12, pp. 572 – 576, 2006.
- [226] The Modelica Association, “System Structure and Parameterization (SSP).” <https://ssp-standard.org>, 2025. Zuletzt zugegriffen am 06.01.2025.
- [227] M. Krammer, M. Benedikt, T. Blochwitz, K. Alekeish, N. Amringer, C. Kater, S. Materne, R. Ruvalcaba, K. Schuch, J. Zehetner, M. Damm-Norwig, V. Schreiber, N. Nagarajan, I. Corral, T. Sparber, S. Klein, and J. Andert, “The distributed co-simulation protocol for the integration of real-time systems and simulation environments,” in *Proceedings of the 50th Computer Simulation Conference, SummerSim ’18*, (San Diego, CA, USA), Society for Computer Simulation International, 2018.
- [228] M. Krammer, K. Schuch, C. Kater, K. Alekeish, T. Blochwitz, S. Materne, A. Soppa, and M. Benedikt, “Standardized integration of real-time and non-real-time systems: The distributed co-simulation protocol,” in *Proceedings of the 13th International Modelica Conference, Regensburg, Germany, March 4–6, 2019*, pp. 87–96, 02 2019.
- [229] ECLIPSE FOUNDATION, “Eclipse OpenMCx™.” <https://projects.eclipse.org/projects/automotive.openmcx>, 2025. Zuletzt zugegriffen am 06.01.2025.
- [230] M. Benedikt, D. Watzenig, and J. Zehetner, “Functional Development of Modern Control Units through Co-Simulation and Model Libraries,” *ATZ-elektronik worldwide*, vol. 10, pp. 30–33, Juni 2015.

- [231] N. Marko, J. Ruebsam, A. Biehn, and H. Schneider, "Scenario-based testing of adas - integration of the open simulation interface into co-simulation for function validation," in *Proceedings of the 9th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications, SIMULTECH 2019, (Setubal, PRT)*, p. 255–262, SCITEPRESS - Science and Technology Publications, Lda, 2019.
- [232] N. Hirsenkorn, *Modellbildung und Simulation der Fahrzeugumfeldsensorik*. Dissertation, Technische Universität, München, 2018.
- [233] T. Hanke, *Virtual Sensorics: Simulated Environmental Perception for Automated Driving Systems*. Dissertation, Technische Universität, München, 2020.
- [234] B. Schütt, M. Heinrich, S. Marahrens, J. M. Zöllner, and E. Sax, "An application of scenario exploration to find new scenarios for the development and testing of automated driving systems in urban scenarios," in *Proceedings of the 8th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems, VEHITS 2022, Online Streaming, April 27-29, 2022* (J. Ploeg, M. Helfert, K. Berns, and O. Gusikhin, eds.), pp. 338–345, SCITEPRESS, 2022.
- [235] P. Milgram, H. Takemura, A. Utsumi, and F. Kishino, "Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum," in *Photonics for industrial applications*, pp. 282–292, 1995.
- [236] S. M. Serrano, Izquierdo, I. G. Daza, Sotelo, and D. F. Llorca, "Digital twin in virtual reality for human-vehicle interactions in the context of autonomous driving," in *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, pp. 590–595, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023.
- [237] M. Hartmann, M. Viehweger, W. Desmet, M. Stolz, and D. Watzenig, "Pedestrian in the loop: An approach using virtual reality," in *2017 XXVI International Conference on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT)*, pp. 1–8, 2017.
- [238] T. Koduri, D. Bogdoll, S. Paudel, and G. Sholingar, "Aureate: An augmented reality test environment for realistic simulations," tech. rep., SAE Technical Paper, 2018.
- [239] D. Bogdoll, S. Paudel, and T. Koduri, "Patent No.: US11455565B2 - Augmenting real sensor recordings with simulated sensor data." <https://patentimages.storage.googleapis.com/c2/6c/92/81a99e3b0fc7c3/US11455565.pdf>, September 2022. Zuletzt zugegriffen am 20.02.2025.
- [240] I. Argui, M. Gueriau, and S. Ainouz, "Building a vision-based mixed-reality framework for autonomous driving navigation," in *2023 9th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, pp. 1960–1965, 2023.

- [241] H. Tae, S. Yeo, S. Hwang, S. Park, and G. Hwang, "System-in-the-loop test system with mixed-reality for autonomous ground vehicle (agv) and military applications," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 46383–46394, 2025.
- [242] K. Wang, T. Yu, Z. Li, K. Sakaguchi, O. Hashash, and W. Saad, "Digital twins for autonomous driving: A comprehensive implementation and demonstration," in *2024 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, pp. 452–457, 2024.
- [243] D. R. Behnecke, G. Temme, D. Assmann, F. Utesch, M. Zhao, M. K. M. Mahmod, N. Wojke, D. Käthner, and M. Fischer, "Comparing proving ground and simulation testing for autonomous car functionality," *Proceedings of the DSC 2019 Europe VR*, pp. 145–152, Driving Simulation Association, 2019.
- [244] L. Li, X. Wang, K. Wang, Y. Lin, J. Xin, L. Chen, L. Xu, B. Tian, Y. Ai, J. Wang, D. Cao, Y. Liu, C. Wang, N. Zheng, and F.-Y. Wang, "Parallel testing of vehicle intelligence via virtual-real interaction," *Science Robotics*, vol. 4, no. 28, 2019.
- [245] "Operational Design Domain (ODD) taxonomy for an automated driving system (ADS) – Specification," standard, The British Standards Institution, 2020.
- [246] M. Ito, "Odd description methods for automated driving vehicle and verifiability for safety," *JUCS - Journal of Universal Computer Science*, vol. 27, no. 8, pp. 796–810, 2021.
- [247] "Surface Vehicle Recommended Practice - Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles," standard, SAE International Standard, 2021.
- [248] M. Mages, M. Hopstock, and F. Klanner, "Kreuzungsassistentz," in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (H. Winner, S. Hakuli, and G. Wolf, eds.), pp. 572–581, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.
- [249] Z. Liu, Z. Miao, X. Zhan, J. Wang, B. Gong, and S. X. Yu, "Large-scale long-tailed recognition in an open world," in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2019.
- [250] P. Koopman, "The heavy tail safety ceiling." [https://users.ece.cmu.edu/~koopman/pubs/koopman18\\_heavy\\_tail\\_ceiling.pdf](https://users.ece.cmu.edu/~koopman/pubs/koopman18_heavy_tail_ceiling.pdf), 2018. Zuletzt zugegriffen am 21.02.2025.
- [251] W. Wachenfeld, H. Winner, C. Gerdes, B. Lenz, M. Maurer, S. A. Beiker, E. Fraedrich, and T. Winkle, *Use-Cases des autonomen Fahrens*, pp. 9–37. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.



- [252] D. Grimm, J. Doll, S. Ochs, T. Schamm, S. Knoop, O. Haberny, A. Koch, D. Nienhüser, M. Schütz, M. Schreiber, L. Lüttgens, N. Penning, J. Kammerer, V. Angol, S. Seidel, and D. Fratzke, "Elektrische, vernetzte und autonom fahrende Elektro-Mini-Busse im ÖPNV - EVA-Shuttle-Busse: Schlussbericht." <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A1800484968>, 2021. Zuletzt zugegriffen am 19.02.2025.
- [253] M. Steimle, T. Menzel, and M. Maurer, "A Method for Classifying Test Bench Configurations in a Scenario-Based Test Approach for Automated Vehicles," 2019.
- [254] M. Steimle, N. Weber, and M. Maurer, "Toward generating sufficiently valid test case results: A method for systematically assigning test cases to test bench configurations in a scenario-based test approach for automated vehicles," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 6260–6285, 2022.
- [255] C. King, L. Ries, J. Langner, and E. Sax, "A taxonomy and survey on validation approaches for automated driving systems," in *2020 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, pp. 1–8, Oct 2020.
- [256] E. Seidewitz, "What models mean," *IEEE Software*, vol. 20, pp. 26–32, Sep. 2003.
- [257] A. Albers, C. Mandel, S. Yan, and M. Behrendt, "System of systems approach for the description and characterization of validation environments," in *Design 2018 : proceedings of the 15th International Design Conference, May 21-24, 2018, Dubrovnik, Croatia. Vol. 6. Ed.: D. Marjanović,* p. 2799–2810, Univ, 2018.
- [258] M. Haklay and P. Weber, "Openstreetmap: User-generated street maps," *IEEE Pervasive Computing*, vol. 7, pp. 12–18, Oct 2008.
- [259] F. Poggenhans, *Generierung hochdetaillierter Karten für das automatisierte Fahren*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2019.
- [260] I. Y.-H. Chen, B. A. MacDonald, and B. Wünsche, "Mixed reality simulation for mobile robots," *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 232–237, 2009.
- [261] M. Wegener, M. Hübner, and E. Schnieder, "Anforderungen an ein Referenzmesssystem zur Untersuchung der GPS-Messqualität," *tm - Technisches Messen*, vol. 78, pp. 354–363, 08 2011.
- [262] M. Wegener, *Über die metrologische Qualität der Fahrzeugortung*. Dissertation, Technische Universität, Braunschweig, Nov 2013.
- [263] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML, "Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement." Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 100:2008. Zuletzt zugegriffen am 21.02.2025.

- [264] M. Brahmi, *Bewertung der objektbasierten Umfeldwahrnehmung für Fahrerassistenzsysteme mithilfe von Referenzsystemen*. PhD thesis, Apr 2020.
- [265] PROJ, “PROJ - Mercator Projection.” <https://proj.org/en/9.3/operations/projections/merc.html>, [Zuletzt zugegriffen: 2023-11-12].
- [266] K. He, G. Gkioxari, P. Dollár, and R. B. Girshick, “Mask R-CNN,” *CoRR*, vol. abs/1703.06870, 2017.
- [267] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, “You only look once: Unified, real-time object detection,” in *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 779–788, 2016.
- [268] J. Redmon and A. Farhadi, “Yolov3: An incremental improvement,” 2018.
- [269] M.-J. Kraak, “The space-time cube revisited from a geovisualization perspective,” *Proc 21st Int Cartogr Conf*, 07 2008.
- [270] G. Verdet, C. Desoche, F. Volland, A. Farnè, A. Coudert, R. Hermann, E. Truy, V. Gaveau, F. Pavani, and R. Salemmé, “Assessing spatial and temporal reliability of the vive system as a tool for naturalistic behavioural research,” in *2019 International Conference on 3D Immersion (IC3D)*, pp. 1–8, 2019.
- [271] L. Feinbube, D. Richter, S. Gerstenberg, P. Siegler, A. Haller, and A. Polze, *Technische Berichte Nr. 109 - Software-Fehlerinjektion*. Universitätsverlag Potsdam, 01 2016.
- [272] R. Szeliski, *Image Formation*, pp. 27–83. Cham: Springer International Publishing, 2022.
- [273] M. Mohr, G. Garcia Padilla, K.-U. Däne, and T. D’hondt, *Camera Sensor System Decomposition for Implementation and Comparison of Physical Sensor Models*, pp. 151–163. Cham: Springer International Publishing, 2020.
- [274] M. Pharr and G. Humphreys, *Physically Based Rendering: From Theory to Implementation*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2004.
- [275] P. Schörner, D. Grimm, and J. M. Zöllner, “Towards multi-modal risk assessment,” in *2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)*, pp. 1–7, 2022.
- [276] F. Oboril, P. Schörner, L. Sachße, D. Nees, T. Percin, C. Bürkle, B. Zeifang, H. Gremmelmaier, S. Ochs, B. Gassmann, F. Gottselig, P. Henkel, T. Schulz, P. Kautzmann, M. Frey, K.-U. Scholl, M. Zöllner, and T. Münsterer, “Safe-darchitect: End-to-end architecture for safe and risk-aware automated driving in urban environments,” in *IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 2024.

- [277] Open Source Robotics Foundation, "SDFormat." <http://sdformat.org/>, 2024. Accessed: 2024-01-16.
- [278] W. Hess, D. Kohler, H. Rapp, and D. Andor, "Real-time loop closure in 2d LIDAR SLAM," in *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1271–1278.
- [279] T. Wang, X. Zhu, J. Pang, and D. Lin, "Fcos3d: Fully convolutional one-stage monocular 3d object detection," in *2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW)*, pp. 913–922, 2021.
- [280] B. Schäling, *The Boost C++ Libraries*. XML Press, 2015.
- [281] "Intelligent Transport Systems (ITS); ITS-G5 Access layer in the 5 GHz frequency band; Release 2," standard, Sophia Antipolis, France, Februar 2024.
- [282] M. Sepulcre, J. Gozalvez, and B. Coll-Perales, "Why 6 mbps is not (always) the optimum data rate for beaconing in vehicular networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 16, no. 12, pp. 3568–3579, 2017.
- [283] K. Garlichs, A. Willecke, A.-C. Hagau, and L. C. Wolf, "Maneuver coordination for cavs: Its-g5 channel and service performance evaluation," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 25, no. 7, pp. 6741–6755, 2024.
- [284] N. Lyamin, A. Vinel, D. Smely, and B. Bellalta, "ETSI DCC: Decentralized Congestion Control in C-ITS," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 12, pp. 112–118, 2018.
- [285] "ETSI EN 302 663: Intelligent Transport Systems (ITS); ITS-G5 Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band," standard (draft), European Telecommunications Standards Institute (ETSI), Sophia Antipolis, France, 2019.
- [286] G. Naik, B. Choudhury, and J.-M. Park, "IEEE 802.11bd & 5G NR V2X: Evolution of Radio Access Technologies for V2X Communications," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 70169–70184, 2019.
- [287] CAR 2 CAR Communication Consortium, "Next Generation V2X – IEEE 802.11bd as fully backward compatible evolution of IEEE 802.11p," White Paper, Car2Car Consortium, 2023. Zuletzt zugegriffen am 22.02.2025.
- [288] Kraftfahrt-Bundesamt, "Pressemitteilung Nr. 49/2021 - KBA erteilt erste Genehmigung zum automatisierten Fahren." [https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Allgemein/2021/pm49\\_2021\\_erste\\_Genehmigung\\_automatisiertes\\_Fahren.html](https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Allgemein/2021/pm49_2021_erste_Genehmigung_automatisiertes_Fahren.html), Dezember 2021. Zuletzt zugegriffen am 16.02.2024.
- [289] Beutnagel, Werner, "Weltneuheit im 7er: BMW vereint Level 2+ und 3 beim autonomen Fahren." <https://www.automotiveit.eu/technology/bmw-bringt-level-2-und-3-in-einem-fahrzeug-zusammen-531.html>, Juni 2024. Zuletzt zugegriffen am 02.02.2025.