

Schriftenreihe
Fahrzeugdynamik und Aktive Systeme
am Institut für Fahrzeugtechnik,
TU Braunschweig



Nr: 3

M.Sc.
Holger Daniel Znamiec
2020

Szenariobasierte Testfallermittlung für Autobahnpiloten

Herausgegeben von:
apl. Prof. Dr.-Ing. Roman Henze

Szenariobasierte Testfallermittlung für Autobahnpiloten

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Holger Daniel Znamiec, M.Sc.
geboren in: Salzgitter

eingereicht am: 12.03.2020
mündliche Prüfung am: 25.09.2020

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts
Gutachter: apl. Prof. Dr.-Ing. Roman Henze
Prof. Dr. Ludger Frerichs

Schriftenreihe Fahrzeugdynamik und Aktive Systeme am Institut
für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig

Band 3

Holger Daniel Znamiec

**Szenariobasierte Testfallermittlung
für Autobahnpielen**

Shaker Verlag
Düren 2020

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7738-4

ISSN 2700-046X

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Braunschweig. Zunächst gilt mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay, dem Leiter des Instituts, für das entgegengebrachte Vertrauen sowie den eingeräumten Freiheiten über die vergangenen Jahre hinweg.

Mein außerordentlicher Dank gilt Herrn apl. Prof. Dr.-Ing. Roman Henze sowohl als Gutachter der Prüfungskommission als auch für die Unterstützung, die Förderung, für die vielen Austausche, vor allem aber für das Ermöglichen der zahlreichen, außergewöhnlichen Erfahrungen und gewonnenen Bekanntschaften. Vielen Dank dafür! Ferner danke ich herzlich Herrn Prof. Dr. Ludger Frerichs, Leiter des Instituts für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, für die Übernahme der Mitberichtserstattung sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts, Leiter des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen, für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei *allen* Mitarbeitern des Instituts für Fahrzeugtechnik - sei es für den fachlichen oder überfachlichen Austausch bei frischem Kaffee, für die wohlwollenden Worte oder aber schlichtweg für die stets gute und unkomplizierte Zusammenarbeit.

Ganz besonderer Dank richtet sich an Björn Reuber, Adrian Sonka und Felix Tigges für die Unterstützung, die weit über das Fachliche und Berufliche hinausging. Ihr habt die letzten Jahre zu einer wahrlich tollen Zeit gemacht. Maximilian Flormann, Waldemar Jarisa, Florian Krauns, Jan Sterthoff und Silvia Thal danke ich in besonderem Maße für ihre jeweils ganz individuellen Beiträge, die mir zum Gelingen dieser Arbeit verholfen haben.

Danke sagen möchte ich all' meinen Freunden für die stetige Motivation und das Verständnis in dieser aufregenden Zeit. Meiner Familie danke ich für die endlose Unterstützung und den immer wehrenden Rückhalt. Mama, Papa, Volker und Simon - danke, dass ihr mir diesen Weg ermöglicht, und mich auf ihm begleitet habt!

Abschließend gilt der größte Dank der mir persönlich wichtigsten Person, meiner Frau Sandra Znamiec. Danke für das tägliche Verständnis, die ausdauernde Unterstützung und Motivation, vor allem aber für die uneingeschränkte Liebe.

Kurzfassung

Ein Funktionsnachweis automatisierter Fahrfunktionen mit heutigen streckenbasierten Freigabeprozessen führt zu einem steigenden Aufwand. Für eine Reduktion dessen bedarf es grundlegend neuer Konzeptansätze. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit einem holistischen Vorgehen, um eine realisierbare Grundlage zukünftiger Nachweisprozesse zu schaffen. Dabei liegt der Fokus auf der strukturierten Beschreibung umfangreicher Rahmenbedingungen eines Autobahnpiлотen, die während des Betriebs Einfluss auf dessen Verhalten nehmen, sowie der anschließenden, systematischen Ableitung von Testfällen aus realen Umgebungsdaten für einen effizienten Funktionsnachweis.

Es wird eine Methodik entwickelt, welche mit dem Prozess von der Anforderungsermittlung anhand von Umgebungseinflussgrößen aus dem Aufgabenspektrum eines Autobahnpiлотen beginnt und mit Ansätzen sowie Werkzeugen zur effizienten Durchführung und Bewertung von Tests schließt. Anhand ausgewählter Szenarien und Testfällen der Autobahn werden die einzelnen Teilprozesse entlang der entwickelten Gesamtmethodik diskutiert.

Als zentraler Ansatz wird das szenariobasierte Testen verfolgt. Hierfür wird die kontinuierliche, auf den Autobahnpiлотen wirkende Umgebung systematisch abstrahiert. Zukünftige Prüfvorschriften resultieren nicht mehr aus synthetischen Fahrmanövern, sondern werden anhand des intendierten Anwendungsgebietes in Form relevanter Szenarien aufgabenorientiert abgeleitet. Dabei wird der entstehende Zielkonflikt von einem möglichst hohen Detaillierungsgrad und dem resultierenden Aufwand der nachfolgenden Prozesse durch eine überschaubare Anzahl notwendiger, charakteristischer Merkmale aufgelöst. Im nächsten Schritt wird ein Detektionsprozess vorgestellt, welcher generische Szenarien auf Basis ihrer modularen Bestandteile in hochgenauen Umgebungsdaten deterministisch auffindet.

Die so entstehenden, szenariobezogenen Merkmalräume werden anschließend genutzt, um auf Basis statistischer Methoden konkrete Testfälle des Erwartungs- sowie Grenzbereichs für die jeweilige Fahraufgabe abzuleiten. Um dabei jedoch ein reales Abbild der ursprünglichen Umgebungseinflüsse statischer und dynamischer Natur zu schaffen, werden Korrelationen im Merkmalraum untersucht und hieran deskriptive Parameter als repräsentative Testfälle extrahiert.

Den Ansatz des Funktionsnachweises stellt nun die Auseinandersetzung eines Autobahnpiлотen als *System unter Test* mit den ermittelten Einflussgrößen dar. Zur Reduktion des physischen Aufwandes bei der Durchführung werden der aktuelle Trend einer Kombination verschiedener Testumgebungen aufgegriffen und hierfür Werkzeuge zur Implementierung und Umsetzung der extrahierten Testfälle entwickelt. Die Arbeit schließt mit einem Konzept zur Bewertung des resultierenden Verhaltens eines Autobahnpiлотen. Insbesondere in der Simulation wird eine Bewertung der korrekten Adressierung des automatisierten Fahrzeugs durch das Szenario essentiell.

Abstract

New approaches are required to reduce the resulting, no longer feasible effort of a comprehensive functional validation of automated driving functions when using today's distance based approval processes. The present work deals with a holistic approach to create a feasible basis for future approval processes. The focus is on the structured description of extensive requirements on a highway pilot, which influence its behavior during operation, as well as the subsequent, systematic derivation of test cases from real environmental data for an efficient functional validation.

A methodology is developed that begins with the process of determining requirements based on environmental factors from the range of tasks of a highway pilot and concludes with approaches and tools for the efficient execution and assessment of tests. Based on selected scenarios and test cases of the highway domain, the results of the individual steps are discussed along the overall methodology.

As a central approach, scenario-based testing is pursued. For this purpose, the continuous influencing environment on the highway pilot is systematically abstracted. Future test regulations will no longer result from synthetic driving maneuvers, but will be derived on the basis of the intended operational domain in the form of relevant scenarios in a task-driven manner. The resulting trade-off of the highest possible level of detail and the resulting effort on the subsequent processes is solved by a manageable number of necessary characteristic features. In the next step, a detection process is presented, which determines generic scenarios deterministically based on their modular components in highly precise environmental data.

The resulting scenario specific feature spaces are then used to derive specific test cases of the expected and limit range for the respective driving task by using statistical methods. However, in order to create a realistic image of the original environmental influences of static and dynamic nature, correlations in the feature space are examined and descriptive parameters extracted as representative test cases.

The idea of the function validation approach is to confront the highway pilot as the *system under test* with the determined influencing factors. In order to reduce the physical effort during the test execution, the current trend of a combination of different test environments is captured and tools for the implementation of the extracted test cases are developed. The work concludes with a concept for assessing the resulting behavior of a highway pilot. In the simulation, an evaluation of the correct addressing of the automated vehicle by the scenario will be essential.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes	v
1. Einleitung	1
1.1. Zielsetzung	1
1.2. Aufbau der Arbeit	3
2. Stand der Forschung	5
2.1. Theoretische Grundlagen	5
2.1.1. Automatisiertes Fahren, Autobahnpilot und Funktionsarchitektur	6
2.1.2. Testen im Entwicklungsprozess	7
2.1.3. Testklassifikation und -verfahren	9
2.1.4. Anwendungsfall- und szenariobasiertes Testen	10
2.1.5. Statistische Grundlagen	12
2.1.6. Terminologie und Glossar	14
2.2. Rechtliche Aspekte und Testverfahren zur Markteinführung	15
2.2.1. Zulassungsrecht und Testverfahren	15
2.2.2. Bewertungsverfahren durch Presse und Verbraucherschutz	17
2.3. Auf dem Weg zur Zulassung - Aktivitäten und Forschungsprojekte	18
2.3.1. National	19
2.3.2. International	20
2.4. Ansätze der szenariobasierten Erprobung	23
2.5. Herausforderungen und identifizierter Forschungsbedarf	27
3. Methodik zur Validierung des automatisierten Fahrens	31
3.1. Anforderungen an eine effiziente Erprobungsmethodik	31
3.2. Funktionsprüfung im Kontext des automatisierten Fahrens	32
3.2.1. Definition des Gesamtsystems als System unter Test	32
3.2.2. Definition der Funktionsprüfung	34
3.2.3. Funktionaler Umfang aufgrund des Erprobungsziels	36
3.3. Validierungsmethodik	38
4. Szenario-Definition	41
4.1. Struktur der Szenarien	41
4.1.1. Ansätze der Szenario-Definition	42
4.1.2. Kategorisierung der Umgebungseinflüsse	44
4.1.3. Formale Dekomposition der Szenarien	46
4.2. Relevante Merkmale zur Beschreibung der Szenarien	48
4.2.1. Segmentierung relevanter Umgebungseinflüsse	49
4.2.2. Charakteristische Merkmale	50
4.3. Anwendungsfälle und Szenarien der Domäne Autobahn	53
4.3.1. Anwendungsfälle	53

4.3.2.	Szenario-Erstellung	54
4.3.3.	Auswahl exemplarischer Szenarien	56
5.	Datengrundlage	59
5.1.	Dynamische Umgebungsdaten	59
5.1.1.	Mess- und Versuchsfahrzeuge	60
5.1.2.	3F-Methode und Messkampagne	63
5.1.3.	Verwendete Umgebungsdatenbasis	63
5.2.	Statische Umgebungsdaten	65
6.	Szenario-Detektion in hochgenauen Umgebungsdaten	69
6.1.	Methodisches Vorgehen der Datenanalyse und Ansätze	69
6.2.	Manöverklassifikation	72
6.2.1.	Definition von Manövern und Events	72
6.2.2.	Klassifikation von Manövern	73
6.3.	Generische und modulare Szenario-Detektion	74
6.3.1.	Detektion modularer Szenario-Bestandteile	75
6.3.2.	Definition von Detektionskriterien	76
6.3.3.	Rollentausch und Strukturierung	78
6.4.	Toolkette und Ergebnisdiskussion	80
6.4.1.	Generische Implementierung	80
6.4.2.	Ergebnisdiskussion der Detektion	81
6.5.	Statische Parameter	83
7.	Erstellung repräsentativer Testfälle	85
7.1.	Zielvorstellung und Ansätze der Testfallerstellung	85
7.2.	Testfälle und Extraktionsmethoden	87
7.2.1.	Kategorisierung von Testfällen	87
7.2.2.	Vorgehen zur Parameterextraktion sowie Testfallgenerierung	89
7.3.	Statistische Analyse - Extraktion repräsentativer Parameterausprägungen	91
7.3.1.	Parameterberechnung, Diskretisierung und statistische Bewertung	92
7.3.2.	Analyse von Parameterkorrelationen	98
7.4.	Generierung von Testfällen	101
7.4.1.	Ableitung repräsentativer Testfälle	102
7.4.2.	Ergebnisdarstellung und Diskussion	105
8.	Testprozess zum effizienten Funktionsnachweis	109
8.1.	Testkonzept	109
8.1.1.	Ansatz und Testumgebungen	109
8.1.2.	Umsetzung der Testfälle	112
8.2.	Erprobung in der Simulation	114
8.2.1.	Simulationsumgebung und Modell	114
8.2.2.	Ergebnisse und Bewertung	116
8.3.	Werkzeug zur Erprobung auf dem Prüfgelände	120
8.3.1.	Testmanager	121
8.3.2.	Ansteuerung eines Versuchsträgers	122

9. Zusammenfassung und Ausblick	125
Literatur	129
A. Anhang	141

Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
<i>ACC</i>	Adaptive Cruise Control, engl. für Abstandsregeltempomat
<i>ACSF</i>	Automatically commanded steering function, engl. für automatische Lenkfunktion
<i>AD</i>	Automated Driving, engl. für Automatisiertes Fahren
<i>ADV</i>	Automated Driving Vehicle, engl. für Automatisiertes Fahrzeug
<i>AF</i>	Automatisiertes Fahren, Automatisiertes Fahrzeug
<i>ANB, AEB</i>	Automatische Notbremse, (AEB, engl. Autonomous Emergency Brake)
<i>CAN</i>	Controller Area Network, engl.
<i>dGPS</i>	Differential Global Positioning System, engl. für Differentielles Globales Positionierungssystem
<i>ECU</i>	Electronic Control Unit, engl. für elektronisches Steuergerät
<i>ESC</i>	Electronic Stability Control, engl. für elektronische Stabilitätskontrolle
<i>EU</i>	Europäische Union
<i>FAS</i>	Fahrerassistenzsystem(e)
<i>FN</i>	False Negative, engl. für falsch negativ
<i>FP</i>	False Positive, engl. für falsch positiv
<i>FOT</i>	Field-operational-test, engl. für Felderprobung
<i>GUI</i>	Graphical User Interface, engl. für grafische Benutzeroberfläche
<i>HAD, HAF</i>	Highly automated Driving, Hochautomatisiertes Fahren
<i>HCA</i>	Heading Control Assist, engl. für Spurhalteassistent
<i>idc</i>	Ibeo Data Container, Dateiformat
<i>Iff</i>	Institut für Fahrzeugtechnik
<i>ISO</i>	International Organization for Standardization, engl. für Internationale Organisation für Normung
<i>JAMA</i>	Japan Automobile Manufacturers Association, Inc.
<i>JARI</i>	Japan Automobile Research Institute
<i>Ko-HAF</i>	Kooperatives hochautomatisiertes Fahren, BMWi-Förderprojekt
<i>LC</i>	Lane-Change, engl. für Spurwechsel
<i>LK</i>	Lane-Keeping, engl. für Spurhaltung
<i>mat</i>	Datenformat zur Sicherung von Variablen in Mathworks Matlab
<i>MIL</i>	Model-in-the-Loop, eingebettetes Modell Testen in der Simulation

Abkürzung	Bedeutung
<i>MPC</i>	Multi Purpose Camera, engl. für Multifunktionskamera (Markenname)
<i>MRR</i>	Mid-Range-Radar, engl. für Radar mittlerer Reichweite (Markenname)
<i>NDS</i>	Naturalistic Driving Studies, engl. für naturalistische Fahrverhaltensuntersuchung
<i>NHTSA</i>	National Highway Traffic Safety Administration, zivile Straßenverkehrsbehörde der USA
<i>ODD</i>	Operational Design Domain, engl. für vorgesehene Anwendungsumgebung
<i>RDE</i>	Real Driving Emissions, engl. für Emissionen im realen Fahrbetrieb
<i>SAE</i>	Society of Automotive Engineers
<i>SiL</i>	Software-in-the-Loop, eingebettetes Software Testen in der Simulation.
<i>SH</i>	Spurhalten
<i>SOTIF</i>	Safety Of The Intended Functionality, engl. für Sicherheit der Sollfunktion
<i>SuT</i>	System unter Test
<i>SW</i>	Spurwechsel
<i>TC</i>	Technisches Komitee
<i>THW</i>	Time-Headway, engl. für Zeitlücke voraus
<i>TLC</i>	Time-To-Line-Crossing, engl. für Zeit bis zur Spurmarkierungsüberfahrt
<i>TN</i>	True Negative, engl. für richtig positiv
<i>TP</i>	True Positive, engl. für richtig positiv
<i>TTC</i>	Time-to-Collision, engl. für Zeit bis zur Kollision
<i>UML</i>	Unified Modeling Language, engl. für vereinheitlichte Modellierungssprache
<i>UNECE</i>	Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen
<i>V2X</i>	Vehicle-to-everything, engl. für Verkehrsvernetzung
<i>VDA</i>	Verband der Automobilindustrie
<i>VMAD</i>	Validation Method for Automated Driving, Arbeitsgruppe der UNECE
<i>VuT</i>	Vehicle-under-Test, engl. für zu testendes Fahrzeug
<i>WG</i>	Working Group, engl. für Arbeitsgruppe
<i>XML</i>	Extensible Markup Language, engl. für erweiterbare Auszeichnungssprache, Datenformat

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
a	$[\text{m}/\text{s}^2]$	Beschleunigung
d	$[\text{m}]$	Abstand
Δs	$[\text{m}]$	Strecke
Δt	$[\text{s}]$	Zeitdauer
l	$[\text{m}]$	Länge
μ	$[-]$	Erwartungswert
n	$[-]$	Anzahl
p	$[-]$	Ordnung
r	$[-]$	linearer Korrelationskoeffizient
R	$[-]$	Summe der Korrelationskoeffizienten einer Kombination
ρ	$[\text{m}]$	Radius
σ	$[-]$	Standardabweichung
T	$[\text{s}]$	Zeitlücken
t	$[\text{s}]$	Zeit
v	$[\text{m}/\text{s}], [\text{km}/\text{h}]$	Geschwindigkeit
v_{lim}	$[\text{m}/\text{s}], [\text{km}/\text{h}]$	Geschwindigkeitsbegrenzung
X, Y	$[-]$	statistische Merkmale
\tilde{x}_p	$[-]$	Quantil der Ordnung p

Indizes

Index	Bedeutung
<i>Al</i>	Acceleration lane, engl. für Beschleunigungsstreifen
<i>Axl</i>	Auxillary lane, engl. für Verflechtungsstreifen
<i>crit</i>	kritische Grenze, Ausprägung (5% bzw. 95%-Perzentil)
<i>Dl</i>	Deceleration lane, engl. für Verzögerungsstreifen
<i>Dw</i>	Driveway, engl. für normale Fahrbahn
<i>ego</i>	Ego-Fahrzeug, hier das HAF-System
<i>E</i>	Entry, engl. für Auffahrt
<i>Ex</i>	Exit, engl. für Ausfahrt
<i>exp</i>	expected value, engl. für Erwartungswert
<i>h</i>	hinten
<i>init</i>	initial, bezogen auf den initialen Zeitpunkt
<i>J</i>	Autobahnkreuz
<i>k</i>	Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten
<i>l</i>	links
<i>L</i>	lane, engl. für Spur
<i>min/max</i>	minimal, maximal, bezogen auf das Minimum oder Maximum im Beschreibungszeitraum
<i>n</i>	Laufindex Korrelationskoeffizient
<i>N</i>	maximale Anzahl aufeinanderfolgender Korrelationskoeffizienten
<i>obj</i>	Objekt
<i>r</i>	rechts
<i>R</i>	Rampe
<i>ref</i>	Referenzobjekt, Referenz
<i>rel</i>	relativ
<i>spurm</i>	Spurmarkierung(en)
<i>SH</i>	Spurhalten
<i>SW</i>	Spurwechsel
<i>v</i>	vorne
<i>x</i>	longitudinal, in Längsrichtung
<i>y</i>	lateral, in Querrichtung
<i>1,2,3,...</i>	Nummerierung von Objekten bzw. Fahrzeugen

Abbildungsverzeichnis

1.1. Strukturierung von Teilzielen dieser Dissertation.	2
2.1. Vereinfachte Funktionsarchitektur zum hochautomatisierten Fahren (in Anlehnung an [Reu20], [Son20]).	7
2.2. V-Modell des Entwicklungsprozesses (nach [HK15], [SW15], [Bun20c]).	8
2.3. Testklassifikation (nach [Hof13a]).	9
2.4. Vergleich des Black-Box (a), des White-Box (b) sowie des Grey-Box (c) Tests (nach [Hof13a]).	10
2.5. Prinzip des szenariobasierten Black-Box Testens mit Systemverhalten als Antwort auf Szenarien als Anregung.	11
3.1. Mit seiner Umgebung wechselwirkendes Gesamtsystem zum automatisierten Fahren, bestehend aus Soft- und Hardwarekomponenten.	33
3.2. Abstrahierte Architektur eines Systems zum automatisierten Fahren, reduziert auf die zentralen Aufgaben als <i>System unter Test</i>	33
3.3. Situationen, in denen das automatisierte Fahrzeug SuT (System unter Test) aufgrund der Handlungsplanung sein Verhalten ändert. a) Als reine Reaktion auf ein verzögerndes Objektfahrzeug oder aktives Handeln aufgrund eines langsameren Objektfahrzeuges. b) Als aktive Handlung zur Bewältigung einer strategischen Fahraufgabe.	34
3.4. Einflüsse auf und durch das Gesamtsystem bezogen auf die individuellen Systemaufgaben sowie mit der Umgebung als direkter Einfluss auf die Handlungsplanung.	36
3.5. Generalisierte Zuordnung von Situationsausprägungen zu einer Komfortfunktion (links) sowie einer Sicherheitsfunktion (rechts). Normalbetrieb als funktionaler Anwendungsbereich.	38
3.6. Vollständige Darstellung der entwickelten Methodik als inhaltliches Vorgehen auf dem Weg zum standardisierten Validierungsprozess.	39
4.1. Vergleich der Ansätze von <i>einstufigen</i> und <i>mehrstufigen</i> Szenarien. a) Einstufiges Szenario mit dem Testobjekt <i>System unter Test</i> (SuT) und dem Einfluss durch ein Verzögerungsmanöver eines Objektes zum Zeitpunkt t_1 . b) Mehrstufiges Szenario mit dem Testobjekt SuT und einem Verzögerungsmanöver eines Objektes zum Zeitpunkt t_1 sowie einem Spurwechselmanöver eines weiteren Objektes zum Zeitpunkt t_2	43
4.2. Vergleich der Ansätze <i>nicht-kombinierte</i> und <i>kombinierte</i> Szenarien. a) Nicht-kombiniertes Szenario durch Beteiligung nur eines weiteren Objektes neben dem Testobjekt SuT. b) Kombiniertes Szenario mit dem Testobjekt SuT und zwei weiteren Objekten.	44

4.3.	Kategorisierung der Umgebungseinflüsse auf die Entscheidungsfindung des AF-Systems in die statische und dynamische Umgebung sowie deren weitere Unterteilung in essentielle Szenarienbestandteile zur Kategorisierung der Umgebung.	45
4.4.	Durch Multiplikation der relevanten Beschreibungsbestandteile entstehende Szenario-Struktur auf drei Ebenen.	46
4.5.	Entwicklung von Basis-Szenario, Sub-Szenario, Szene und konkretem Testfall (in Anlehnung an [Zna16]).	46
4.6.	Formale Zusammenhänge von Basis-Szenario, Sub-Szenario, Szene, Situation und konkretem Testfall in Abhängigkeit des Anwendungsfalls. Zuordnung von inhaltlichen Szenariobestandteilen sowie charakteristischen Merkmalen und deskriptiven Parametern.	47
4.7.	Semantische Einteilung der Umgebungseinflüsse sowie funktionale Unterteilung des Ego-Verhaltens zur vollständigen Definition der Szenarien. . .	49
4.8.	Kategorisierung der Positionen, der das Referenzobjekt (Ref.) direkt umgebenden Objekte (in Anlehnung an [TKC18]).	50
4.9.	Semantische Kategorisierung des relevanten Objektverhalten in Spurwechseln (SW) links und rechts, Beschleunigen, Verzögern sowie konstantes Verhalten.	50
4.10.	Unterteilung der Merkmale in Referenzobjekt-bezogen, Objekt-bezogen und Referenzobjekt-Objekt-bezogen sowie Darstellung der charakteristischen Merkmale.	51
4.11.	Exemplarisches Ergebnis der Szenario-Erstellung auf Ebene der Sub-Szenarien für den Anwendungsfall <i>Auffahren auf die Autobahn und Einfädeln in den fließenden Verkehr</i>	55
4.12.	Ausgewählte Szenarien zur Abdeckung der definierten Anwendungsfälle. a) Nicht-kombiniertes Szenario <i>Einscherer</i> von rechts (1 Objekt), b) kombiniertes Szenario <i>Spurwechseln</i> nach links (2 Objekte), c) kombiniertes Szenario <i>Auffahren</i> , sowie d) nicht-kombiniertes Szenario <i>Abfahren</i>	57
5.1.	Versuchs- und Messfahrzeuge TIAMO (links) und TEASY 3 (rechts) mit reduzierter Erkennbarkeit der Zusatzsensorik zur Umgebungsaufzeichnung.	60
5.2.	Umfeldsensorik, dessen Verbaupositionen und Anzahlen des TIAMO (a) und des TEASY 3 (b) zur Schaffung eines detaillierten Umgebungsbildes.	61
5.3.	Architektur der Versuchsträgerhardware zur Aufzeichnung der Sensorsignale sowie der Manipulation von Kommunikationssignalen zur Ansteuerung der Serienaktorik und Regelung des Fahrzeugverhaltens (nach [Son20]).	62
5.4.	Auswahl notwendiger Umgebungsinformationen. Objektinformationen aus der Laserscannersensorik mit angedeuteter Objektbox sowie Informationen über die Ego-Spurmarkierungen aus Laserscanner- sowie Kamerasensorik. Querabstand zur Spurmarkierung $d_{y,spur,m}$, Längs- und Quergeschwindigkeit des Messfahrzeugs $v_{x,ref}, v_{y,ref}$, Längs- und Quergeschwindigkeit der Objekte $v_{x,obj}, v_{y,obj}$, Längs- und Querabstand zu den Objekten $d_{x,obj}, d_{y,obj}$, sowie Breiten der Ego- $d_{L,ego}$ und Nebenspur d_L	64

5.5. In OpenDrive vorliegende Karte der Autobahnen A3, A5, A661 und der Bundesstraße B45 (links) sowie Detailausschnitt eines abgebildeten Autobahnkreuzes.	66
5.6. Vereinfachte Struktur des <i>.osm</i> -Formates mit <i>Ways</i> , <i>Nodes</i> und <i>Tags</i> zur Beschreibung von Straßennetzen.	67
6.1. Methodischer Ablauf der Szenario-Detektion mit Szenario-Beschreibungen und der repräsentativen Datenbasis als Eingang sowie als Ergebnis die nun detektierten und isolierten Szenarien, aus welchen sich die notwendigen Räume charakteristischer Merkmale ergeben.	70
6.2. Drei Stufen der Szenario-Detektion: 1. Auffinden des Referenzverhaltens, 2. Klassifikation der Objektposition und des -verhaltens, sowie 3. Einordnung in das statische Umfeld. Die zeitliche Dauer eines Szenarios Δt als Dauer des charakteristischen Verhaltens von Objekten am Beispiel des Spurwechsels des Referenzobjektes.	71
6.3. Klassifikation von Spurwechselmanövern am Beispiel des Referenzobjektes. Eventdefinition über Bedingungen des Querabstandes zur Spurmarkierung $d_{y,spur,m}$ sowie der Quergeschwindigkeit $v_{y,ref}$. Beginnevent (I), charakteristisches Event (II) und Endevent (III).	73
6.4. Detektion von Beginn-, charakteristischen und Endevents über Detektionskriterien zur Identifikation von Szenariobestandteilen.	75
6.5. Prozess der modularen Detektion. Dreistufige Detektion der Szenariobestandteile, Kombination von Events der einzelnen Bestandteile zu Start-, charakteristischen und Endsituationen zur Klassifikation vollständiger Szenarien im Zeitbereich. Isolation der detektierten Szenarien.	76
6.6. Verschiedene Möglichkeiten des Rollentausches durch Variation des Referenzobjektes und Kombination mit dem entsprechenden Objektverhalten.	79
6.7. Visualisierung der Ergebnisstruktur ausgewählter Signale der detektierten Szenarien mit zugehörigen Zeitabschnitten Δt	80
6.8. Struktur und Klassifikation von Streckentypen anhand von <i>Nodes</i> und <i>Ways</i> am Beispiel der Abfahrt.	84
7.1. Qualitative Darstellung der Ableitung repräsentativer Testfälle in relevanten (Grenz-)Bereichen durch Analyse und Ausnutzung von Abhängigkeiten im mehrdimensionalen Parameterraum.	87
7.2. Kategorisierung von Erwartungs- und Grenzfällen anhand der statistischen Häufigkeit der Ausprägung zu verwendender Parameter sowie der einhergehenden Kritikalität eines Testfalls. Extremfall als überkritische Ausprägung. (vgl. [OIC19])	88
7.3. Ansätze zur datengetriebenen Erstellung von Testfällen.	90
7.4. Vorgehen zur Extraktion der Parameterausprägungen sowie Korrelationsanalyse.	92
7.5. Schritte des Extraktionsprozesses deskriptiver Parameter. a) Berechnung des deskriptiven Maßes, b) Diskretisierung des Wertebereiches eines Parameters a sowie Klassifikation eines Parameters b, c,d) Berechnung des statistischen Maßes innerhalb der Parameterklassen.	92

7.6. Verteilungen dynamischer Merkmale mit paarweiser Klassifikation sowie statistischer Bewertung innerhalb der Klassen für das Einscherer-Szenario. Erwartungswerte sowie 5%-Perzentile der initialen Relativgeschwindigkeit $v_{x,rel,init}$ in initialen Längsgeschwindigkeitsklassen des Referenz-Objektes $v_{x,ref,init}$	95
7.7. Verteilungen dynamischer Merkmale mit paarweiser Klassifikation sowie statistischer Bewertung innerhalb der Klassen für das Einscherer-Szenario. Erwartungswerte sowie 5%-Perzentile des initialen Längsabstandes $d_{x,init}$ in initialen Relativgeschwindigkeitsklassen $v_{x,rel,init}$	97
7.8. Häufigkeitsverteilungen für die Merkmale <i>Länge des Beschleunigungsstreifens</i> $l_{Al,E}$ des Auffahrtsszenarios (a) sowie <i>Länge des Verzögerungsstreifens</i> $l_{Dl,Ex}$ des Abfahrtszenarios (b).	98
7.9. Ergebnis der paarweisen Korrelationsanalyse ausgewählter Merkmale des Einscherer-Szenarios.	100
7.10. Vorgehen zur Erstellung repräsentativer Testfälle.	101
7.11. Ableitung deskriptiver Parameter durch Ausnutzung der paarweisen Korrelationen mit $ r \geq 0,7$ am Beispiel des Einscherer-Szenarios für ausgewählte Parameter.	102
7.12. Permutation und Bestimmung der Reihenfolge vierer Parameter mit n aufeinander folgenden, den Zusammenhang beschreibenden Korrelationskoeffizienten $r(b, a)$, $r(d, b)$, etc., sowie $k = n!$ resultierenden Kombinationsmöglichkeiten.	104
7.13. Möglichkeiten der Zuordnung bei nicht Erreichen der vollständigen Reihenfolge anhand des maximalen Korrelationskoeffizienten (a) oder szenariobasiert (b).	105
7.14. Ausgewählte Erwartungs- (a) sowie Grenzfälle (b) des Einscherer-Szenarios mit der Startparameterklasse Längsgeschwindigkeit des Referenzobjektes.	106
8.1. Ansatz des Testkonzeptes mit der Umsetzung der Testfälle in verschiedenen Testumgebungen zur Realisierung eines effizienten Funktionsnachweises.	110
8.2. Zuordnung von Testfällen sowie nachträgliche Einbindung realer Fälle in die Simulation (nach [Zna+17]).	111
8.3. Ausnutzung des selben Gesamtsystems (vgl. Abb. 3.1) in unterschiedlichen Testumgebungen.	112
8.4. Modellierung den Beschleunigungs- (a) und Spurwechselferhaltens (b) als standardisierte Objektkinematik (nach [Win19]).	113
8.5. <i>Realistisches</i> Konzept zur virtuellen Umsetzung der Szenarien am Beispiel des Einscherers.	115
8.6. Kaskade zur generischen Aus- und Bewertung des Systemverhaltens (in Anlehnung an [Win19]).	116
8.7. Auswertung des Systemverhaltens in Einscherer-Szenarios von Erwartungs- (a) und Grenzfällen (b) durch eine realistische Erstellung.	117
8.8. Auswertung des Systemverhaltens in Grenzfällen des kombinierten Spurwechsel-Szenarios für das Konzept der realistischen Entstehung (a) sowie der direkten Konfrontation (b).	118
8.9. Konzept des Testmanagers zur Überwachung und Koordination sowie Ansteuerung von Objekten in komplexen Szenarios.	121

A.1. Wertebereiche der dynamischen charakteristischen Merkmale des Einschere-Szenarios.	148
A.2. Ausgewählte Erwartungsfälle des Auffahrt Szenarios mit der Startparameterklasse Längsgeschwindigkeit des Referenzobjektes.	149
A.3. Ausgewählte Grenzfälle des Auffahrt Szenarios mit der alternativen Startparameterklasse Relativgeschwindigkeit zum vorderen Objekt.	149
A.4. Ausgewählte Erwartungsfälle des kombinierten Spurwechsel-Szenarios mit der Startparameterklasse Längsgeschwindigkeit des Referenzobjektes.	151
A.5. Ausgewählte Grenzfälle des kombinierten Spurwechsel-Szenarios mit der Startparameterklasse Längsgeschwindigkeit des Referenzobjektes.	151
A.6. Ausgewählte Erwartungs- (a) und Grenzfälle (b) des Ausfahrt Szenarios mit der Startparameterklasse Längsgeschwindigkeit des Referenzobjektes.	153
A.7. Co-Simulation eines Einschere-Szenarios mit SuT und Objekt.	154
A.8. Auswertung des Systemverhaltens in Auffahrt-Szenarios von Erwartungs- (a) und Grenzfällen (b).	154
A.9. Grafische Benutzeroberfläche des Testmanagers (nach [Sch19a]).	155

Tabellenverzeichnis

2.1. Konfusionsmatrix als Kombination der realen Ausprägung und des Klassifikationsergebnisses (nach [SL19a]).	13
4.1. Charakteristische dynamische Merkmale zur Beschreibung eines nicht-kombinierten Szenarios inklusive zugehöriger deskriptiver Maße.	52
4.2. Auswahl an Kombinationsmöglichkeiten aus Streckentyp und Ego-Manöver respektive AF Fahraufgabe nach [ZTF19] und den daraus entstehenden Szenarien aus Sicht des <i>System unter Test</i>	55
4.3. Bezüglich Relevanz bewertete Kombinationsmöglichkeiten aus Objektposition und Objektverhalten für nicht-kombinierte und kombinierte Szenarien nach [ZRH19b], [TOK19c].	56
6.1. Bedingungen der Manöverklassifikation eines Spurwechsels nach links des Ego-Fahrzeugs als Referenzobjekt (nach [Son20]).	73
6.2. Auflistung generischer Detektionskriterien und Schwellwerte des (Objekt-) Verhaltens in Bezug auf Abb. 5.4. Für die Definition von Spurwechselmanöver siehe Tabelle 6.1.	77
6.3. Auflistung generischer Detektionskriterien und Schwellwerte der Objektpositionen in Bezug auf Abb. 5.4.	77
6.4. Auflistung generischer Detektionskriterien und Schwellwerte des Streckentyps in Bezug auf Abb. 5.4.	77
6.5. Anzahl an detektieren Szenarien in Bezug auf Abbildung 4.12.	81
6.6. Anzahl ausgewählter Szenarien der Ground Truth (nach [Led19]) sowie der Detektion.	82
7.1. Die Grenzen der betrachteten Wertebereiche als auch die Schrittweite zur Diskretisierung und Klasseneinteilung der dynamischen charakteristischen Merkmale.	94
7.2. Angenommene Maße zur statistischen Bewertung der Teilmengen der klassifizierten Merkmale.	95
7.3. Auswahl extrahierter Parameterwerte des Einscherer-Szenarios.	96
7.4. Korrelationskoeffizienten der paarweisen Analyse der <i>Erwartungswerte</i> für das Einscherer-Szenario.	101
7.5. Korrelationskoeffizienten der paarweisen Analyse der <i>Grenzwerte</i> für das Einscherer-Szenario.	101
7.6. Ausgewählte Erwartungs- und Grenzfälle des Einscherer-Szenarios mit der Startparameterklasse Längsgeschwindigkeit des Referenzobjektes.	107
7.7. Anzahlen abgeleiteter und überprüfter Testfälle der in Kapitel 4.3.3 definierten Beispielszenarien für den Normalbetrieb.	108

A.1. Leistungsdaten relevanter Umgebungssensorik der Versuchsfahrzeuge (nach [Rob17a], [Rob17b], [Ibe14], [Ibe10], [SIC12].	141
A.2. Statische charakteristische Merkmale zur Szenariobeschreibung inklusive zugehörigem deskriptivem und statistischem Maß zur Berechnung deskriptiver Parameter.	142
A.3. Detektionskriterien für ein Einschere-Szenario (s. Abb. 4.12a), aus Perspektive des Ego-Fahrzeugs als Referenzobjekt.	143
A.4. Detektionskriterien für ein kombiniertes Spurwechsel-Szenario (s. Abb. 4.12b), aus Perspektive des Ego-Fahrzeugs als Referenzobjekt.	144
A.5. Detektionskriterien für ein kombiniertes Auffahrt-Szenario (s. Abb. 4.12c), aus Perspektive des Egofahrzeugs als Referenzobjekt.	145
A.6. Detektionskriterien für ein Abfahrt-Szenario (s. Abb. 4.12d), aus Perspektive des Egofahrzeugs als Referenzobjekt.	146
A.7. Anzahl an Detektionen statischer Streckentypen.	146
A.8. Deskriptive Parameter der statischen Merkmale.	147
A.9. Ausgewählte Erwartungs- und Grenzfälle des Auffahrt Szenarios zu den Abbildungen A.2 und A.3.	150
A.10. Ausgewählte Erwartungs- und Grenzfälle des kombinierten Spurwechsel-Szenarios zu den Abbildungen A.4 und A.5.	152
A.11. Ausgewählte Erwartungs- und Grenzfälle des Ausfahrt Szenarios zu der Abbildung A.6.	153