

Eine Methode zur Auswahl kritischer Fahr Szenarien für automatisierte Fahrzeuge anhand einer objektiven Charakterisierung des Fahrverhaltens

A method for the selection of critical driving scenarios for automated vehicles based on an objective characterization of driving behavior



Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades

Master of Science (M.Sc.)

an der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München

Betreut von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp
Thomas Ponn, M.Sc.
Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

Eingereicht von Alexander Schwab, B.Sc.

Eingereicht am 10.05.2019

Aufgabenstellung

Eine Methode zur Auswahl kritischer Fahrscenarien für automatisierte Fahrzeuge anhand einer objektiven Charakterisierung des Fahrverhaltens

Die Bewertung der Sicherheit von autonomen Fahrzeugen ist aufgrund der unendlichen Zahl an möglichen Verkehrsszenarien äußerst aufwändig und komplex. Deshalb wird aktuell an verschiedenen Verfahren geforscht, mit denen eine begründete Reduzierung der relevanten Testfälle möglich ist. Eine Option besteht in der objektiven Charakterisierung des Fahrverhaltens des autonomen Fahrzeugs. Wenn die automatisierte Fahrfunktion beispielsweise generell dicht auf ein vorausfahrendes Fahrzeug auffährt und bei einem einscherenden Vorderfahrzeug spät bremst, dann können diese Eigenschaften bei der Erstellung von kritischen Szenarien berücksichtigt werden. Folglich können mit dieser Herangehensweise speziell auf das zu testende Fahrzeug zugeschnittene kritische Szenarien definiert werden. Bei der anschließenden Sicherheitsbewertung kann der Fokus auf diese Situationen gelegt und somit die Anzahl der notwendigen Testfälle reduziert werden.

In einer theoretischen Masterarbeit soll ein Testkatalog entwickelt werden, mit dem das Fahrverhalten autonomer Fahrzeuge objektiv und effizient charakterisiert werden kann. Effizient bedeutet, dass die Charakterisierung anhand einer möglichst geringen Versuchsanzahl erfolgt. Folgende Punkte sind durch Alexander Schwab zu bearbeiten:

- Einarbeitung in die Absicherung von hochautomatisierten und autonomen Fahrzeugen und Literaturrecherche zur objektiven Beschreibung des Fahrverhaltens
- Strukturierte Erarbeitung von relevanten Fahreigenschaften in Längs- und Querrichtung. Dazu zählen zum Beispiel die Reaktionszeit auf einscherende Fahrzeuge oder der Abstand bei konstanter Folgefahrt. Eine mögliche Struktur kann durch die Aufteilung der Fahrfunktion in einzelne Teilfunktionen (z. B. Vorderfahrzeug folgen) geschehen. Dabei kann außerdem der Input (z. B. Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs in Längsrichtung) in konstant, transient und periodisch aufgeteilt werden.
- Definition der Testabläufe sowie der für die Bewertung notwendigen Key Performance Indikatoren (KPI).
- Der Projektpartner TÜV SÜD wird ausgewählte Versuche am Prüfgelände oder mit Hilfe von Simulationen durchführen. Die Auswertung dieser Versuche ist Teil der vorliegenden Masterarbeit.
- Dokumentation des Testkatalogs und der erzielten Ergebnisse

Die Ausarbeitung soll die einzelnen Arbeitsschritte in übersichtlicher Form dokumentieren. Der Kandidat/Die Kandidatin verpflichtet sich, die Masterarbeit selbständig durchzuführen und die von ihm verwendeten wissenschaftlichen Hilfsmittel anzugeben.

Die eingereichte Arbeit verbleibt als Prüfungsunterlage im Eigentum des Lehrstuhls.

Ausgabe: 10.11.2018

Abgabe: 10.05.2019

Prof. Dr.-Ing. M. Lienkamp

Betreuer: Thomas Ponn, M. Sc.

Geheimhaltungsverpflichtung

Herr: **Schwab, Alexander**

Gegenstand der Geheimhaltungsverpflichtung sind alle mündlichen, schriftlichen und digitalen Informationen und Materialien die der Unterzeichner vom Lehrstuhl oder von Dritten im Rahmen seiner Tätigkeit am Lehrstuhl erhält. Dazu zählen vor allem Daten, Simulationswerkzeuge und Programmcode sowie Informationen zu Projekten, Prototypen und Produkten.

Der Unterzeichner verpflichtet sich, alle derartigen Informationen und Unterlagen, die ihm während seiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik zugänglich werden, strikt vertraulich zu behandeln.

Er verpflichtet sich insbesondere:

- derartige Informationen betriebsintern zum Zwecke der Diskussion nur dann zu verwenden, wenn ein ihm erteilter Auftrag dies erfordert,
- keine derartigen Informationen ohne die vorherige schriftliche Zustimmung des Betreuers an Dritte weiterzuleiten,
- ohne Zustimmung eines Mitarbeiters keine Fotografien, Zeichnungen oder sonstige Darstellungen von Prototypen oder technischen Unterlagen hierzu anzufertigen,
- auf Anforderung des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik oder unaufgefordert spätestens bei seinem Ausscheiden aus dem Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik alle Dokumente und Datenträger, die derartige Informationen enthalten, an den Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik zurückzugeben.

Besondere Sorgfalt gilt im Umgang mit digitalen Daten:

- Für den Dateiaustausch dürfen keine Dienste verwendet werden, bei denen die Daten über einen Server im Ausland geleitet oder gespeichert werden (Es dürfen nur Dienste des LRZ genutzt werden (Lehrstuhllaufwerke, Sync&Share, GigaMove).
- Vertrauliche Informationen dürfen nur in verschlüsselter Form per E-Mail versendet werden.
- Nachrichten des geschäftlichen E-Mail Kontos, die vertrauliche Informationen enthalten, dürfen nicht an einen externen E-Mail Anbieter weitergeleitet werden.
- Die Kommunikation sollte nach Möglichkeit über die (my)TUM-Mailadresse erfolgen.

Die Verpflichtung zur Geheimhaltung endet nicht mit dem Ausscheiden aus dem Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, sondern bleibt 5 Jahre nach dem Zeitpunkt des Ausscheidens in vollem Umfang bestehen. Die eingereichte schriftliche Ausarbeitung darf der Unterzeichner nach Bekanntgabe der Note frei veröffentlichen.

Der Unterzeichner willigt ein, dass die Inhalte seiner Studienarbeit in darauf aufbauenden Studienarbeiten und Dissertationen mit der nötigen Kennzeichnung verwendet werden dürfen.

Datum: 03.11.2018

Unterschrift: _____

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Garching, den 10.05.2019

Alexander Schwab, B. Sc.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	III
Formelzeichen.....	V
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Ziele der Arbeit	1
1.3 Aufbau der Arbeit	2
2 Stand der Wissenschaft.....	3
2.1 Definition des automatisierten Fahrens	3
2.1.1 Level eines automatisierten Fahrzeugs	3
2.1.2 Einsatzgebiete eines automatisierten Fahrzeugs	4
2.2 Begriffsdefinitionen.....	5
2.2.1 Definition Szene.....	5
2.2.2 Definition Situation	5
2.2.3 Definition Szenario.....	6
2.2.4 Szenarien für die Entwicklung automatisierter Fahrzeuge.....	6
2.3 Forschungsansätze zur Verringerung der Szenarienzahl	9
2.4 Objektiverte Bewertung von Fahrerassistenzsystemen.....	12
2.5 Fahrstil.....	14
2.6 Szenarien zur Bewertung von Fahrern und automatisierten Fahrzeugen	23
2.7 Ableitung offener Fragen aus dem Stand der Technik.....	25
3 Modell zur objektiven Charakterisierung des Fahrverhaltens	27
3.1 Bestimmung relevanter Szenarien.....	27
3.1.1 Praktische Führerscheinprüfung.....	28
3.1.2 theoretische Führerscheinprüfung	30
3.1.3 Fahrsicherheitstraining.....	32
3.1.4 Szenarien aus der Literatur.....	34
3.2 Beschreibung der Szenarien durch Kennwerte und Parameter	35
3.2.1 Parameter	36

3.2.2	Kennwerte.....	38
3.3	Einordnung in Komfort, Fahrstil, Sicherheit und Regelkonformität.....	40
3.4	Beschreibung der logischen Szenarien	41
3.5	Durchführung konkreter Szenarien mittels Simulation	44
3.6	Vorgehen zur Versuchsauswertung	46
3.7	Bewerten der Fähigkeiten nach Sicherheit, Regelkonformität, Komfort und Fahrstil	49
3.7.1	Sicherheit.....	49
3.7.2	Regelkonformität.....	50
3.7.3	Komfort und Fahrstil.....	50
3.8	Bestimmung von Schwachstellen und Anpassung der Szenarien anhand der Ergebnisse.....	54
3.9	Zusammenfassung des Vorgehensmodells	55
4	Ergebnisse	57
4.1	Szenariobeschreibung Überholvorgang	57
4.2	Auswertung der Simulationsergebnisse.....	58
4.2.1	Regelkonformität.....	58
4.2.2	Sicherheit.....	60
4.2.3	Fahrstil	62
4.2.4	Fahrkomfort	64
4.3	Schwachstellen des Systems und mögliche Anpassungen des Szenarios ...	70
4.3.1	Schwachstellen des Systems	70
4.3.2	Mögliche Anpassungen des Szenarios.....	70
4.4	Weitere simulierte Szenarien.....	71
4.4.1	Testszenario: μ -Split	71
4.4.2	Testszenario: S-Kurve	72
4.4.3	Testszenario: Stopp & Go.....	73
5	Diskussion der Ergebnisse	75
6	Zusammenfassung und Ausblick	77
6.1	Zusammenfassung.....	77
6.2	Ausblick.....	78
	Abbildungsverzeichnis	i
	Tabellenverzeichnis.....	v
	Literaturverzeichnis.....	ix
	Anhang	xv

Abkürzungsverzeichnis

UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
ISO	Internationale Organisation für Normung
VUT	Vehicle under test
TSV	Traffic simulation vehicle
StVO	Straßenverkehrsordnung
Pkw	Personenkraftwagen
Lkw	Lastkraftwagen
ACC	Adaptiv cruise control
LKA	Lane keeping assistant
LCA	Lane changing assistant
SAE	Society of Automotive Engineers
NHTSA	National Highway Traffic Safety
Euro NCAP	European New Car Assessment Programme
MM	Mission Master
N	Navigation
M	Maneuver
C	Control
PEGASUS	Projekt zur Etablierung von generell akzeptierten Szenarien und Situationen
TTC	Time to Collision
TÜV	Technischer Überwachungsverein
VW	Volkswagen
VBA	Visual Basic for Applications
ABS	Antiblockiersystem
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$a_{\text{quer,ideal}}$	m/s ²	krümmungsminimale Querbeschleunigung
w	m	Breite des Fahrstreifenwechsels
D	m	Endposition des Fahrstreifenwechsels
D_0	m	Startposition des Fahrstreifenwechsels
l	m	Länge des Fahrstreifenwechsels
v	m/s	Longitudinale Geschwindigkeit
$v_{\text{long,max}}$	m/s	max. longitudinale Geschwindigkeit
y_{max}	m	max. Position in y-Richtung
$s_{\text{long,max}}$	m	max. longitudinaler Abstand
$a_{\text{long,max}}$	m/s ²	max. longitudinale Beschleunigung
$a_{\text{lat,max}}$	m/s ²	max. laterale Beschleunigung
$\dot{j}_{\text{long,max}}$	m/s ³	max. longitudinale Ruck
$\dot{j}_{\text{lat,max}}$	m/s ³	max. lateraler Ruck
μ		Haftreibungskoeffizient

1 Einleitung

Im folgenden Abschnitt werden die Motivation für das Thema der objektiven Fahrverhaltenscharakterisierung automatisierter Fahrzeuge und die daraus entstehende Fragestellung beschrieben. Ebenso wird der Aufbau der Arbeit dargestellt, um einen Überblick über die Vorgehensweise zu bieten.

1.1 Motivation

Seit einigen Jahren werden vermehrt Fahrerassistenzsysteme (FAS) in Fahrzeugen verbaut. Diese sollen das Fahren sicherer gestalten, haben jedoch auch das Potential den Komfort des Fahrers und der Insassen zu erhöhen. Rund 90 % aller Autounfälle sind auf menschliche Fehler zurückzuführen, da Gefahren nicht erkannt oder Situationen falsch eingeschätzt werden. Die Unfallzahlen können durch den Einbau eines abstandsgeregelten Tempomaten (ACC), eines Spurhalteassistenten (LKA) eines Spurwechselassistenten (LCA), und eines Notbremsassistenten deutlich verringert werden [1]. Insgesamt ist festzustellen, dass die entwickelten Fahrerassistenzsysteme und -funktionen in immer höherem Umfang in die Längs- und Querführung eingreifen und die Automation von Fahrzeugen weiter ansteigt. Sollen solche Systeme im öffentlichen Straßenverkehr eingesetzt werden, muss vorher ein technisch erforderlicher Reifegrad und eine ausreichende Testtiefe nachgewiesen werden, um einen sicheren Betrieb, besonders in komplexen Verkehrssituationen, zu gewährleisten. Die Anzahl möglicher Szenarien steigt jedoch mit der Komplexität der Anwendungsszenarien stark an. So müssen für die Absicherung einer Funktionsversion eines automatisierten Fahrzeugs ca. 50 Millionen Testkilometer gefahren werden, weil die Schwierigkeit eines Szenarios unter anderem auch vom Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer abhängig ist [2].

1.2 Ziele der Arbeit

Eine Möglichkeit um die Anzahl an Testsituationen zu verringern, besteht in der objektiven Fahrverhaltenscharakterisierung des automatisierten Fahrzeugs. Fährt ein Fahrzeug beispielsweise in Kurven sehr nah an die Kurveninnenseite, so kann diese Eigenschaft des Fahrzeugs für die Gestaltung zukünftiger Szenarien herangezogen werden. Es wird ein Testkatalog erarbeitet, der relevante Situationen beinhaltet, mit denen das Fahrverhalten bewertet werden kann. Es erfolgt eine Aufteilung nach relevanten Fahreigenschaften in Längs- und Querführung. Ebenso werden Testabläufe definiert und Szenarien beschrieben. Dazu werden notwendige Key Performance Indikatoren festgelegt. Aus Testergebnissen kann eine Aussage über das Fahrverhalten eines Fahrzeugs getroffen werden kann. Anschließend lassen sich Szenarien dahingehend anpassen, dass kritische Situationen überprüft werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sechs aufeinander aufbauende Kapitel. Im ersten Abschnitt werden die Motivation für das Thema, die Zielsetzung und der Aufbau der Arbeit erläutert. Das zweite Kapitel umfasst den Stand der Wissenschaft mit einem Überblick über den aktuellen Stand der Forschung und der Erklärung wichtiger Definitionen. Ebenso erfolgt die Einordnung in den Gesamtkontext der Arbeit. Im dritten Teil der Arbeit folgt die Beschreibung des Vorgehensmodells und die Bestimmung relevanter Szenarien und Bewertungskriterien. In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der Simulation dargestellt und beschrieben. Die Diskussion dieser Resultate der Arbeit folgt im fünften Kapitel. Im sechsten Abschnitt folgt die Zusammenfassung und die Einordnung der Ergebnisse in den Gesamtkontext der gestellten Anforderungen und Ziele (Abbildung 1.1).

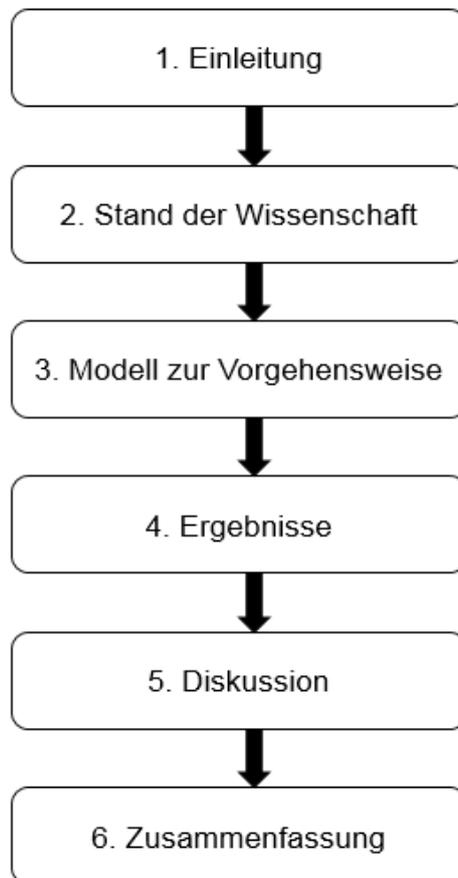


Abbildung 1.1: Aufbau der Arbeit

2 Stand der Wissenschaft

In diesem Kapitel werden die wissenschaftlichen Grundlagen dieser Arbeit erläutert. Zu Beginn werden die verschiedenen Stufen eines automatisierten Fahrzeugs definiert. Daran schließt sich die Beschreibung wichtiger Begriffe an, die für die grundlegende Beschreibung des Fahrverhaltens nötig sind. Ebenso wird auf die Bewertung von Fahrern und automatisierten Fahrzeugfunktionen mit Hilfe verschiedener Testmethoden eingegangen.

2.1 Definition des automatisierten Fahrens

In diesem Abschnitt wird der aktuelle Stand der Wissenschaft in Bezug auf automatisierte Straßenfahrzeuge dargestellt. Dabei wird auf die verschiedenen Stufen der Fahrfunktion eingegangen, und es werden Use Cases beschrieben und kritische Situationen betrachtet.

2.1.1 Level eines automatisierten Fahrzeugs

Die Organisation SAE INTERNATIONAL [3] ist in der Automobilbranche tätig und verfasst hierfür allgemein anerkannte Standards. In dem SAE-Standard J3016 hat die Organisation die Level der Automation für ein automatisiertes Fahrzeug publiziert und definiert. Diese werden in Tabelle 2.1 erläutert.

Tabelle 2.1: SAE Level für autonome Fahrzeuge [3]

Level	Bezeichnung	Beispiel	Fahraufgabe	Überwachung	Rückfallebene	Einsatzgebiet
0	Keine Automation	Warnung	Fahrer	Fahrer	keine	Fahrer
1	Assistenzsysteme	ACC oder LKA	Fahrer & System	Fahrer	Fahrer	beschränkt
2	Teilautomatisierung	ACC & LKA	System	Fahrer	Fahrer	beschränkt
3	Bedingte Automatisierung	Autobahnpilot	System	System	Nutzer	beschränkt
4	Hochautomatisierung	Autonomes Fahren	System	System	System	beschränkt
5	Vollautomatisierung	Fahrerloses Fahrzeug	System	System	System	unbeschränkt

In Level 0 findet keine Automatisierung des Fahrens statt. Die Fahrzeugführung übernimmt komplett der Fahrer, wobei Systeme wie das Antiblockiersystem (ABS) und das elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) zur Fahrzeugstabilisierung verwendet werden. In Stufe 1 übernehmen das System und der Fahrer einzelne Aufgaben der Längs- oder die Querführung. Das System assistiert dem Fahrer dabei nur. Ein Beispiel hierfür ist der Tempomat oder ein Spurhalteassistent. Die zweite Stufe wird als teilautomatisiertes Fahren bezeichnet. Das System kann Längs- und Querführung gleichzeitig übernehmen. Es muss jedoch durch den Fahrer überwacht werden. Ein Beispiel hierfür ist ein Fahrzeug, bei dem ein ACC und ein LKA die longitudinale und laterale Führung übernehmen. Beim dritten Level spricht man von einem bedingt automatisierten Fahrzeug. Der Nutzer muss dabei das System nicht überwachen, sondern nach einer vorher definierten Übergabezeit nur übernehmen, wenn das System ihn dazu auffordert. Ein Beispiel hierfür ist der Audi AI Staupilot [4]. In Stufe 4, dem hochautomatisierten Fahren, erledigt das System die Fahraufgaben selbstständig. Ein Fahrer ist als Rückfallebene nicht nötig. Das Einsatzgebiet ist jedoch beschränkt. Im fünften Level fährt das Fahrzeug vollautomatisiert. Als Rückfallebene dient, wie in der vierten Stufe, das System. Das Einsatzgebiet des Fahrzeugs ist jedoch hier unbeschränkt [3].

2.1.2 Einsatzgebiete eines automatisierten Fahrzeugs

Fahrzeuge der Automationslevel 1 bis 4 sind in ihrem Einsatzgebiet beschränkt. Jedoch lassen sich mögliche Anwendungsfälle und -gebiete der Fahrfunktion zuordnen. Die amerikanische NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION (NHTSA) [5] unterteilt die Funktionen eines autonomen Fahrzeugs nach Merkmalen des Systems. So werden die Fähigkeitsgrenzen des Systems je nach Ausprägung folgendermaßen definiert [6, S. 6]:

- Straßentypen, die für den sicheren Betrieb festgelegt sind
- geographische Besonderheiten
- Geschwindigkeitsbereiche
- Umwelteinflüsse, bei denen die Fahrfunktion arbeitet
- andere Systembeschränkungen

EURO NCAP [7, S. 13] unterteilt autonome Systeme nicht nach den Merkmalen, sondern nach ihrem jeweiligen Einsatzgebiet. Die Gebiete teilen sich wie folgt auf:

- Einparkfunktion
- Stadtfunktion
- Überlandfunktion
- Staufunktion
- Autobahnfunktion

WACHENFELD et al. [8, S. 13] definieren die Merkmale zur Beschreibung der Use-Cases folgendermaßen:

- Art der Beförderung
- Maximal zulässige Gesamtmasse
- Einsatzhöchstgeschwindigkeit

- Szenerie
- Dynamische Elemente
- Informationsfluss zwischen Fahrroboter und anderen Instanzen
- Verfügbarkeitskonzept
- Erweiterungskonzept
- Eingriffsmöglichkeiten

Es lässt sich abschließend festhalten, dass bei einer autonomen Fahrfunktion mit beschränktem Einsatzgebiet verschiedene Use-Cases zur Beschreibung im Einsatz sind, jedoch sind diese derzeit auf bestimmte Fahrfunktionen begrenzt.

2.2 Begriffsdefinitionen

Um funktionale Module, wie die Kontextmodellierung und Verhaltensplanung, eines automatisierten Fahrzeugs entwickeln und testen zu können, bedarf es einer Definition einheitlicher Schnittstellen. ULBRICH et al. [9, S. 1] sehen eine Szene als zentrale Schnittstelle zwischen Wahrnehmung und Verhaltensplanung. Dabei ist eine Situation eine zentrale Schnittstelle innerhalb der Verhaltensplanung.

2.2.1 Definition Szene

ULBRICH et al. [9, S. 2] beschreiben eine Szene folgendermaßen:

„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). In der realen Welt ist sie immer unvollständig, fehlerbehaftet, unsicherheitsbehaftet und aus der Perspektive eines oder mehrerer Beobachter (subjektive Szene).“

Eine Szene besteht aus der Szenerie, die u.a. das Fahrstreifennetz und den Umweltbedingungen beinhaltet. Weiter besteht diese aus dynamischen Elementen, die sich durch Energie fortbewegen und die Selbstrepräsentation der Akteure und Beobachter, die u.a. die Fähigkeiten und Fertigkeiten dieser beschreiben [9, S. 3].

2.2.2 Definition Situation

Laut ULBRICH et al. [9, S. 6] ist eine Situation wie folgt definiert:

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

Eine Situation lässt sich vollständig aus einer Szene und den Zielen und Werten eines Systems ableiten, wodurch sich eine große Schnittmenge bezüglich der beinhaltenden Informationen zwischen einer Szene und einer Situation ergibt. Es gibt es einen großen Überlappungsbereich zwischen einer Szene und einer Situation. Bestandteile einer Situationsrepräsentation sind jedoch nur funktionsrelevante Informationen, die durch Ziele und Werte sowie funktions-spezifischen Situationsaspekten ergänzt werden. [9, S. 7]

2.2.3 Definition Szenario

ULBRICH et al. [9, S. 10] geben für ein Szenario diese Definition vor:

„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.“

Ein Szenario ist mindestens aus einer Szene und dessen Elementen aufgebaut. Ergänzt wird es durch Use-Cases wie dem Funktionsumfang, dem beabsichtigten Verhalten und funktionalen Systemgrenzen. Es wird komplettiert durch Aktionen und Ereignisse sowie Ziele und Werte.

2.2.4 Szenarien für die Entwicklung automatisierter Fahrzeuge

Die Norm ISO 26262 stellt einen Entwicklungsprozess elektronischer Systeme für Kraftfahrzeuge dar. Dazu gehören auch Fahrerassistenz- und Fahrzeugführungssysteme. In diesem Prozess können in verschiedenen Schritten szenarienbasierte Ansätze für unterschiedliche Betrachtungen verwendet werden. Daraus resultieren verschiedene Anforderungen an die Darstellung eines Szenarios.

Funktionale Szenarien

Funktionale Szenarien stellen die erste und abstrakteste Ebene von Szenarien dar. Die Beschreibung der Szenarien ist dabei auf sprachlicher Ebene [10, S. 131]. BAGSCHIK et al. [10, S. 131] definieren funktionale Szenarien daher folgendermaßen:

„Funktionale Szenarien stellen Betriebsszenarien des Entwicklungsgegenstands auf semantischer Ebene dar. Die Entitäten und Beziehungen zwischen den Entitäten der Anwendungsdomäne werden in sprachlich gefassten Szenarien ausgedrückt. Die Szenarien sind widerspruchsfrei. Das Vokabular der funktionalen Szenarien ist spezifisch für den Anwendungsfall und die -domäne und kann unterschiedliche Detailgrade aufweisen.“ (Abbildung 2.1)

Logische Szenarien

Werden funktionale Szenarien detailliert und im physikalischen Zustandsraum beschrieben, so spricht man von logischen Szenarien. Die Parameter von funktionale Szenarien lassen sich in Parameter der Entitäten (absolute Parameter) und in Parameter der Beziehungen (relative Parameter) überführen [10, S. 132]. Daher beschreiben BAGSCHIK et al. [10, S. 133] logische Szenarien wie folgt:

„Logische Szenarien stellen Betriebsszenarien durch Entitäten und Beziehungen dieser Entitäten mithilfe von Parameterbereichen im Zustandsraum dar. Für die einzelnen Parameterbereiche können optional statistische Verteilungen angegeben werden. Zusätzlich können optional die Beziehungen der Parameterbereiche zueinander mithilfe von Korrelationen oder numerischen Bedingungen modelliert werden. Logische Szenarien enthalten eine formale Beschreibung von Szenarien.“ (Abbildung 2.1)

Konkrete Szenarien

Konkrete Szenarien beschreiben die Entitäten eines Szenarios mit eindeutigen Parametern im Zustandsraum. Werden die Parameter eines logischen Szenarios genau einem festen Wert zugeordnet, ist das Szenario konkret [10, S. 133]. BAGSCHIK et al. [10, S. 133] definieren diese wie folgt:

„Konkrete Szenarien stellen Betriebsszenarien eindeutig durch Entitäten und Beziehungen dieser Entitäten mithilfe von festen Werten im Zustandsraum dar.“ (Abbildung 2.1)

Funktionale Szenarien	Logische Szenarien	Konkrete Szenarien
<u>Basisstrecke:</u> 3- streifige Autobahn in Kurve Begrenzung auf 100 km/h durch Verkehrszeichen rechts und links	<u>Basisstrecke:</u> Breite Fahrstreifen [2,3..3,5] m Kurvenradius [0,6..0,9] km Pos_Verkehrszeichen [0..200] m	<u>Basisstrecke:</u> Breite Fahrstreifen [3,2] m Kurvenradius [0,7] km Pos_Verkehrszeichen [150] m
<u>Stationäre Objekte:</u> -	<u>Stationäre Objekte:</u> -	<u>Stationäre Objekte:</u> -
<u>Bewegliche Objekte:</u> Ego, Stau; Interaktion: Ego in Manöver „Annähern“ auf mittleren Fahrstreifen, Stau zähfließend	<u>Bewegliche Objekte:</u> Stauende_Pos [10..200] m Stau_Geschw. [0..30] km/h Ego_Abstand [50..300] m Ego_Geschw. [80..130] km/h	<u>Bewegliche Objekte:</u> Stauende_Pos 40 m Stau_Geschw. 30 km/h Ego_Abstand 200 m Ego_Geschw. 100 km/h
<u>Umwelt:</u> Sommer, Regen	<u>Umwelt:</u> Temperatur [10..40] °C Tröpfchengröße [20..100] µm	<u>Umwelt:</u> Temperatur 20 °C Tröpfchengröße 30 µm



Abbildung 2.1: Abstraktionsebenen von Szenarien anhand eines Beispielszenarios im Entwicklungsprozess [10, S. 132]

Wie In Abbildung 2.2 dargestellt wird, lassen sich die Inhalte von Szenarien über ein 5-Ebenen-Modell erfassen. Das erste Level beschreibt die Straßentopologie sowie die Beschaffenheit und Zustand des Fahrstreifenbelags. Im zweiten Level ist die Leitinfrastruktur dargestellt. Darunter fallen bauliche Begrenzungen, dauerhafte Fahrbahnmarkierungen, Schilder und Verkehrsleit-einrichtungen. In Level drei sind temporäre Beeinflussungen der ersten beiden Level beschrieben. Das sind Baustellen, die die normale Leitinfrastruktur und Fahrbahn nur einen be-grenzten Zeitabschnitt überlagern. Level vier hält alle beweglichen Objekte, wie andere Verkehrsteilnehmer und deren manöverbasierte Interaktionen, fest. Im fünften Level schließlich sind Umweltbedingungen definiert. Dabei sind Umweltbedingungen wie Wetter, Tageszeit und deren Einflüsse auf Level 1 bis 4 modelliert. [11]



Abbildung 2.2: 5-Ebene-Modell zur Beschreibung von Szenarien [11]

Anwendung der Szenarienbeschreibungen

V-Modell basierte Entwicklungsprozesse, wie auch die Norm ISO 26262, sind derzeitiger Stand der Technik für die Entwicklung autonomer Fahrzeuge [12, S. 691]. Wie in Abbildung 2.3 dargestellt wird, können funktionale Szenarien zur Absicherung in der Konzeptphase dienen. Mit logischen Szenarien lassen sich Anforderungen an das Entwicklungsobjekt überprüfen. Konkrete Szenarien kommen gegen Ende des Entwicklungsprozesses in der Testphase zur Anwendung.

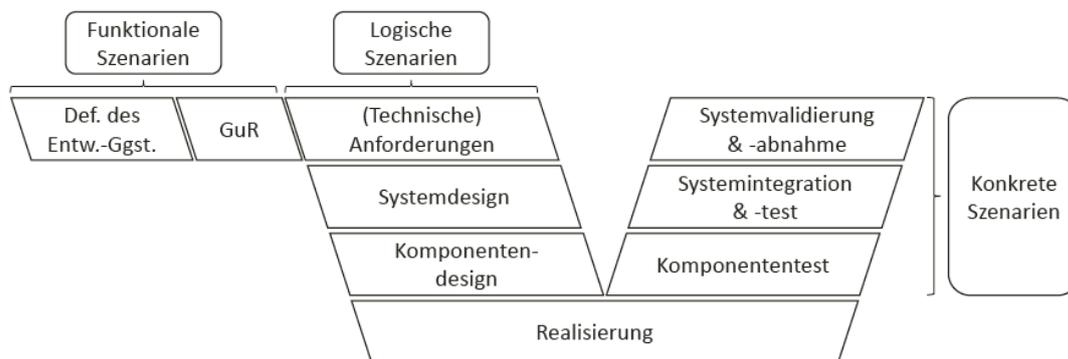


Abbildung 2.3: V-Modell basierter Entwicklungsprozess nach ISO 26262: mit Zuordnung der funktionalen, logischen und konkreten Szenarien [10, S. 134]

BAGSCHIK et al. [10, S. 133] leiten aus den Prozessschritten der Norm ISO 26262 Anforderungen an Szenarien im Entwicklungsprozess ab. Dabei wird zwischen Anforderungen für Konzeptphase (K), Systementwicklung (S) und Testprozess (T) unterschieden (Tabelle 2.2).

Tabelle 2.2: Anforderungen an Szenarien im Entwicklungsprozess

Prozessphase	Beschreibung
K1	Szenarien müssen aus der sprachlich gefassten Definition eines Entwicklungsgegenstands in eine semi-formale Darstellung überführt werden können
K2	Szenarien müssen für menschliche Experten in einheitlicher Fachsprache formuliert werden können
S1	Szenarien müssen Parameterbereiche für Zustandsgrößen abbilden können
S2	Szenarien müssen eine formale Ordnung für die Darstellung in Parameterbereichen bereitstellen (zum Beispiel Dateiformat)
T1	Szenarien müssen so detailliert beschrieben werden, dass sie mit Prüfverfahren ausgeführt werden können
T2	Szenarien müssen eindeutig definiert werden und dürfen keine Interpretationsmöglichkeiten aufweisen (Reproduzierbarkeit)
T3	Szenarien müssen effizient maschinen-lesbar dargestellt werden

2.3 Forschungsansätze zur Verringerung der Szenarienzahl

Eine Testdurchführung aller möglichen Szenarien ist sehr zeitintensiv. Eine Eingrenzung der zu testenden Szenarien ist daher nötig. Dabei gibt es viele Herangehensweise. Einige mögliche Verfahren werden im Folgenden näher beschrieben.

Es besteht die Möglichkeit alle möglichen Zustände eines HAF durch Kombination der Szenarioentitäten zu erstellen. Anschließend werden alle Szenarien bis auf die relevanten Szenarien aussortiert [12, S. 696]. Die Anzahl der Szenarien lässt sich durch bestimmte Kriterien verringern:

- Unlogische Szenarien aufgrund der Kombinatorik der Szenarioentitäten werden nicht betrachtet [12, S. 696]
- Kinematische Einschränkungen der Fahrzeugbewegung [13, S. 64]
- Anwendung außerhalb der spezifischen Systemgrenzen, in denen das System jedoch funktioniert [13, S. 64]
- Mehrfachversagen der Komponenten kann ausgeschlossen werden (zu unwahrscheinlich) [13, S. 64]

Die zweite Möglichkeit ist es, nicht einzelne Szenarien aus einer Gesamtheit von Szenarien auszuschließen, sondern Bereiche zu betrachten, in denen relevanten Szenarien vorkommen. Die dazugehörigen Bereiche sind:

- Situationen, im vorhergesehenen Einsatzgebiet (normale Funktion) [14, S. 78]

- Situationen, in denen das System zwar funktioniert, aber nicht dafür ausgelegt ist (missbräuchliche Nutzung) [14, S. 78]
- Situationen, in denen die Systemgrenzen erreicht werden [14, S. 78]
- Situationen, die aufgrund von Fehlfunktionen des Systems entstehen (Systemausfall) [14, S. 78]

AMERSBACH UND WINNER [15] verfolgen den Ansatz, dass einzelne Fahrfunktionen nicht doppelt getestet werden. Dafür definieren sie sechs aufeinander aufbauende Ebenen mit den jeweils zugehörigen Schnittstellen.

Ebene 0 beschreibt, welche Informationen überhaupt wahrgenommen werden können. Beeinflusst wird diese von der Infrastruktur, dem Wetter und Objekten im Straßenverkehr. In der Ebene Informationswahrnehmung werden die Sensordaten erfasst und die Sensorrohdaten an die Informationsverarbeitung weitergegeben. Es werden Objekte klassifiziert und Szenen erstellt. Von Ebene 2 zu Ebene 3 werden Szenen übergeben, die nach ULBRICH et al. [9] definiert sind.

Dort wird die Situation verarbeitet, indem mögliche Trajektorien für relevante Entitäten der übergebenen Szene erstellt werden. In der vierten Ebene wird basierend auf dem Situationsmodell das Verhalten des hochautomatisierten Fahrzeugs generiert. Daraus folgt die Zieltrajektorie, die in Ebene 5 ausgeführt wird. (Abbildung 2.4)

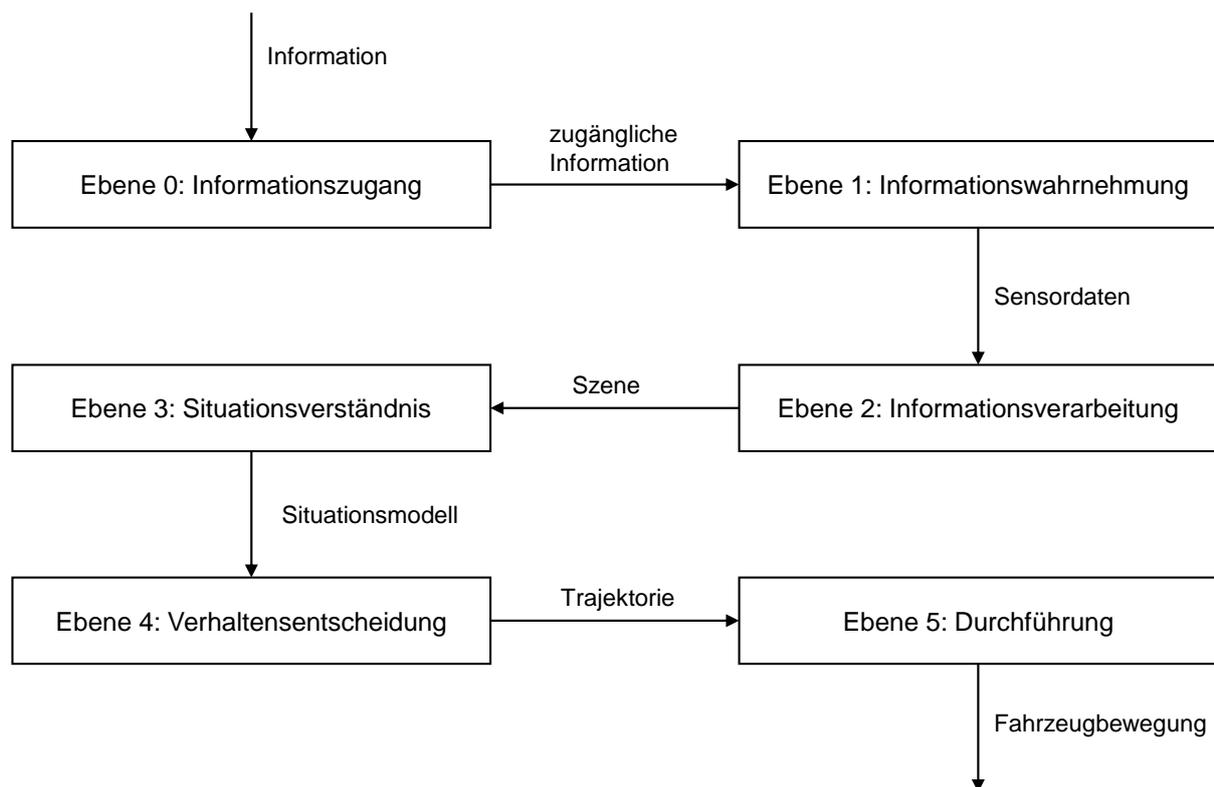


Abbildung 2.4: Dekompositionsebenen [15]

Sind Szenarien in einer Szenariendatenbank festgehalten, sollen diese laut AMERSBACH UND WINNER [15] den Dekompositionsebenen konkret zugeordnet werden, wodurch überflüssige Szenarien vermieden werden können.

Ebenso lassen sich fehlende Szenarien für entsprechende Dekompositionsebenen erkennen und ergänzen. Der Fokus des Konzepts liegt nicht auf dem Gesamtfahrzeug, sondern auf dem Verhalten in den einzelnen Dekompositionsebenen. Fehler und Abweichungen in einzelnen Ebenen können durch darauffolgende Ebenen wieder ausgeglichen werden.

VOLLRATH [16, S. 73] verknüpft Unfallarten mit Fahrmanövern. Daraus lassen sich Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme ableiten. Dabei zählt nicht nur die Vermeidung des Unfallszenarios, sondern die Beherrschung von Fahrmanövern. Zur Einordnung der Manöver wird eine Klassifizierung nach NAGEL [17, S. 205] verwendet. Die Unfallarten werden gemäß der Datenbank der GIDAS [18] untergliedert.

SCHULDT [19, S. 114] entwickelt in seiner Dissertation einen modularen Testbaukasten, mit dem virtuelle Szenarien erzeugt werden können. Dazu baut er diese auf einem 4-Ebenen-Modell auf (Abbildung 2.5).

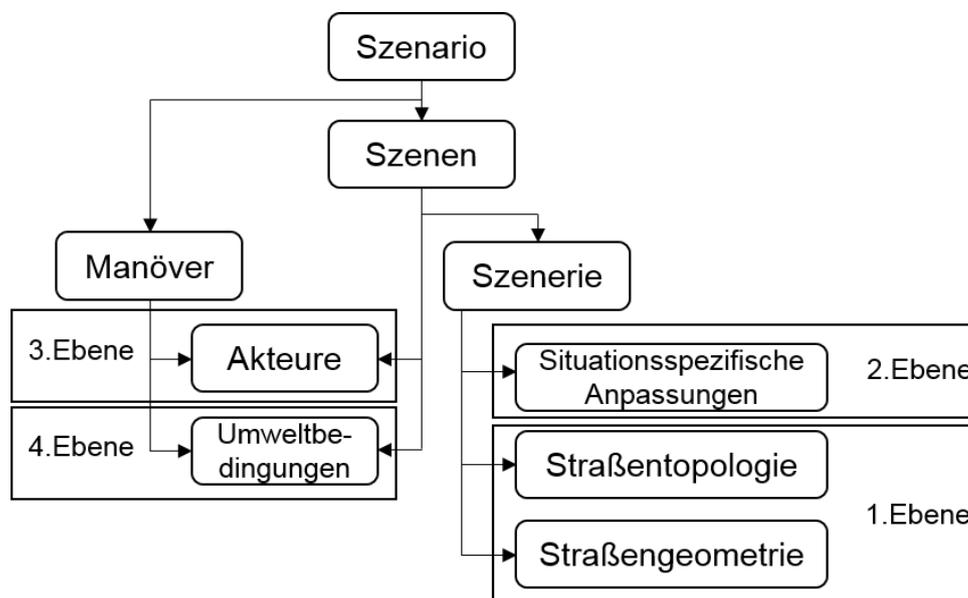


Abbildung 2.5: Aufbau eines Szenarios durch das 4-Ebenen-Modell [19, S. 115]

Die generierten Szenarien werden mit Fahrmanövern nach TÖLLE [20] ergänzt. Zur Erstellung der Szenarien werden technische Regelwerke, beispielsweise für die Auslegung von Straßen, verwendet. Anschließend erfolgt eine Aufteilung der Szenarien in folgende Klassen:

- Anfahren
- Folgen
- Annähern
- Passieren
- Kreuzung überqueren
- Fahrstreifenwechsel
- Abbiegen
- Umkehren
- Parken

2.4 Objektivierete Bewertung von Fahrerassistenzsystemen

Holzinger et al. [21, S. 49] beschreiben eine Methode zur objektiven Bewertung des subjektiven Empfindens. Dazu wird das Fahrzeug mit Messsystemen ausgestattet. Die Messwerte werden über Befragungen zur Subjektivbeurteilung vom Fahrersitz und vom Beifahrersitz aus eingeordnet (Abbildung 2.6).

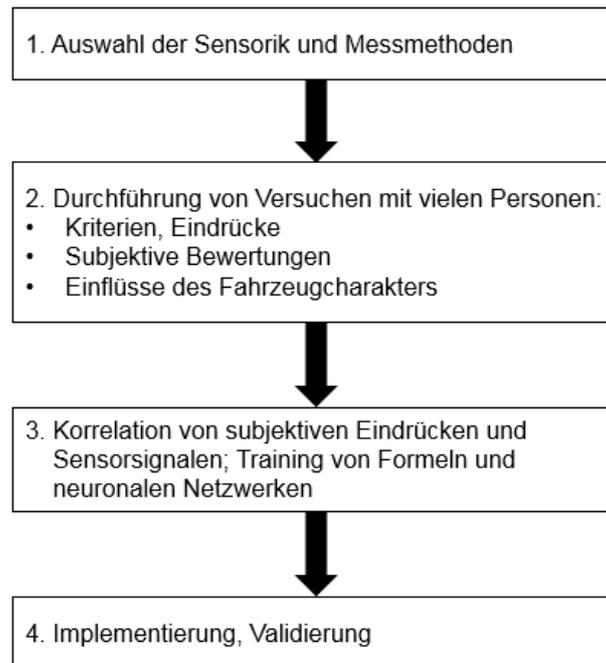


Abbildung 2.6: Methode zur objektiven Bewertung subjektiven Empfindens [21, S. 49]

Zur Objektivierung des subjektiven Empfindens müssen physikalisch messbare Größen definiert werden, die der subjektiven Wahrnehmung entsprechen. Anhand derer kann eine objektive Bewertung bestimmt werden, die nicht von einem Fahrer abhängig ist. [22, S. 17]

Die Wahl des Fahrstreifens und die Fahrstreifenhaltegüte sind nicht rein durch physikalische Größen des Fahrzeugs geprägt, sondern auch durch die Wahrnehmung der Umgebung und des Streckenverlaufs. Das Sicherheitsempfinden der Kurswahl eines Fahrstreifenhaltesystems (LKA) hängt von der Differenz zwischen dem durchfahrenen und dem erwarteten Kurswinkel ab. Bei der Fahrstreifenhaltebewertung wird die Regelgüte von Lenkrad- und Gierwinkel sowie die Fahrlinienwahl selbst bestimmt. Eine Fahrlinie wirkt dann auf den Fahrer als sicher und angenehm, wenn die Fahrlinie möglichst große Radien und harmonischen Richtungsänderungen entspricht. Die Analyse einer LKA-Fahrt wird idealerweise in Einzelsegmente von 2 bis 5 s unterteilt und anhand der Kriterien bewertet. (Tabelle 2.3) [22, S. 18]

Tabelle 2.3: Kriterien für die Bewertung der aktiven Fahrspurhaltung (LKA) [22, S. 18]

LKA-Kriterien	Beschreibung der Hauptparameter
Fahrstreifenführungsgüte	Querabweichung zur Zieltrajektorie
Fahrstreifenführungsqualität	Winkelabweichung zur Zieltrajektorie

Fahstreifennutzung	Nutzungsgrad der vorhandenen Fahstreifenbreite
Abstand zur Fahstreifenbegrenzung links	Kleinster Abstand zur Fahstreifenbegrenzung links
Abstand zur Fahstreifenbegrenzung rechts	Kleinster Abstand zur Fahstreifenbegrenzung rechts

HOLZINGER et al. [22, S. 18] haben ebenso Kriterien definiert, anhand derer sich ein Fahstreifenwechsel eines Fahstreifenwechselassistenten (LCA) bewerten lässt (Tabelle 2.4).

Tabelle 2.4: Kriterien für die Bewertung eines automatisierten Fahstreifenwechsels [22, S. 19]

LCA-Kriterien	Beschreibung der Hauptparameter
Querschleunigung Maximalwerte	Maximalwerte der Querschleunigung beim Initiieren des Fahstreifenwechsels und beim Beenden
Querschleunigung Ruck	Änderungen der Querschleunigung (Ruck), die für die Insassen während des Fahstreifenwechsels spürbar sind
Quergeschwindigkeit	Maximum der Quergeschwindigkeit und Zeit für die Durchführung des Fahstreifenwechsels
Versatz im Fahstreifen	Vollständigkeit des Fahstreifenwechsels – akzeptable Fahrzeuglage in dem neuen Fahstreifen
Gleichmäßigkeit	Symmetrie und Harmonie des Fahstreifenwechsels

Ebenso lässt sich nach HOLZINGER et al. [22, S. 18] Kriterien für ein ACC-System ableiten. Diese werden in Tabelle 2.5 dargestellt:

Tabelle 2.5: Kriterien für die Bewertung eines Abstandsregeltempomaten [22, S. 19]

ACC-Kriterien	Beschreibung
Längsbeschleunigung Maximalwerte	Maximalwerte der Längsbeschleunigung beim Beschleunigen oder Verzögern
Längsbeschleunigung Ruck	Änderungen der Längsbeschleunigung (Ruck), die spürbar sind
Reaktionszeit	Reaktion auf ein einscherendes Fahrzeug
Abstand bei Folgefahrt	Abstand zu Vorfahrzeug
Abstand zu langsameren Fahrzeug	Minimaler Abstand zu langsameren Fahrzeug

2.5 Fahrstil

Fahrerassistenzsysteme sollen die Verkehrssicherheit erhöhen. Außerdem ist es zunehmend das Ziel, Fahrkomfort und Fahrspaß zu unterstützen. Idealerweise sollen auch Fahrhandlungen erkannt werden, die den Fahrkomfort verringern, damit diese vermieden werden können [23, S. 18]. Nebenbei spielen aber auch das Vertrauen in das Fahrzeug, die Usability und die Kontrollierbarkeit eine wichtige Rolle bei der Entscheidung, für oder gegen das automatisierte Fahren [23, S. 99]. Die Fahrzeugbewegungen dürfen während dem automatisierten Fahren nicht zu dynamisch sein, jedoch sollten Durchschnittsgeschwindigkeiten nicht zu weit abgesenkt werden, da sich die Fahrzeit sonst verlängert [24, S. 65]. Die Längsdynamik eines Fahrzeugs bestimmt das Komfort- und Sicherheitsempfinden bei einem automatisierten Fahrzeug [25]. Die Querbesehleunigung stellt einen entscheidenden Faktor beim Komfortempfinden eines Fahrstreifenwechsels dar [24, S. 65].

BELLEM [26, S. 23] unterteilt Fahrstile in einen sehr komfortorientierten Fahrer, einem normalen und einem dynamischen und aggressiven Fahrer. Komfort wird unterteilt in Fahrkomfort, der durch den Aufbau des Fahrzeugs auf den Fahrer einwirkt und Fahrkomfort, der unter anderen von Beschleunigungen, Ruck und Abständen abhängt.

ABENDROTH et al. [27] beschreiben Fahrstile aufgrund von Kenngrößen für Geschwindigkeit, Längsbesehleunigung und Abstand zum Vorausfahrenden. Dabei definiert er die Fahrstile „eher langsam und komfortbewusst“, „durchschnittlich mit hohem Sicherheitsbewusstsein“ und „schnell und sportlich“ [27, S. 10].

Laut SCHULZ et al. [28, S. 1126] ist der Grundgedanke eines Fahrers, möglichst schnell, einfach und mit möglichst geringem Aufwand das vorgegebene Ziel zu erreichen. Ebenso muss das Fahrzeug weitere, nicht definierbare, Bedürfnisse erfüllen. Daraus lassen sich die beiden Grundmotive des Auslebens, das einen offensiv-riskanten Fahrstil hervorruft und des Absicherns, das für einen defensiv-vermeidenden Fahrstil steht, ableiten. SCHULZ [28, S. 1126] definiert folgende Fahrstile:

- ruhig-angepasst
- aktiv-dynamisch
- sportlich-ambitioniert
- affektiv-unausgewogen
- unsicher-ungeschickt
- aggressiv-rücksichtslos

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine Einteilung des Fahrstils grundsätzlich von einem zurückhaltend defensiven, einem ausgewogen normalen zu einem sportlich aggressiven Fahrer verwendet wird. Häufig erfolgt eine Einteilung nur in einem defensiven, einem normalen und einem aggressiven Fahrstil [29–31]. Diesen Bereichen lassen sich andere Definitionen zuordnen.

Die Vielzahl an Definitionen von Fahrstilen ist auf eine große Anzahl von Einflussfaktoren zurückzuführen. Dabei spielen neben bewussten Entscheidungen, der Bekanntheit der Strecke und dem grundsätzlichen Fahrcharakter, auch Faktoren wie Alter, Geschlecht und Persönlichkeit eine Rolle [31, S. 668]. MARTINEZ et al. [31] unterteilen die Einflussfaktoren auf den Fahrstil in Umweltfaktoren und menschliche Faktoren:

Tabelle 2.6: Einflussfaktoren auf den Fahrstil [31, S. 668]

Umweltfaktoren	Menschliche Faktoren
Verkehr	Alter
Jahreszeit	Geschlecht
Wetter	Charakter
Straßentyp	Verhaltensweise
Andere Verkehrsteilnehmer	Risikobereitschaft
Sichtweite	Aggressionspotential
Straßenzustand	Bekanntheit der Strecke
Tageszeit	Bewusste Entscheidungsfindung
Fußgänger, Fahrradfahrer	Vertrautheit mit dem Fahrzeug
Lichtbedingungen	Fahrerfahrung
Fahrer	Zustand des Fahrers (Drogen, Alkohol, Müdigkeit, Ablenkung, Stress, Panik)

MARTINEZ et al. [31, S. 667] beschreiben die Einflussgrößen zur Entstehung des Fahrstils bei einem Fahrers in Abbildung 2.7. Der Fahrstil ist dabei stark abhängig von den vorliegenden Fahrbedingungen, wie dem Straßentyp und den Wetterbedingungen. Auf der Fahrebene resultiert das Fahrverhalten aus der eigenen Entscheidung des Fahrers. Die Fahrerfahrung beeinflusst den hervorgerufenen Fahrstil. Im Gegensatz dazu steht auf der Fahrzeugebene das Fahrmuster des Fahrzeugs bzw. Fahrers, welches durch ein ausgeführtes Fahrmanöver konditioniert wird.

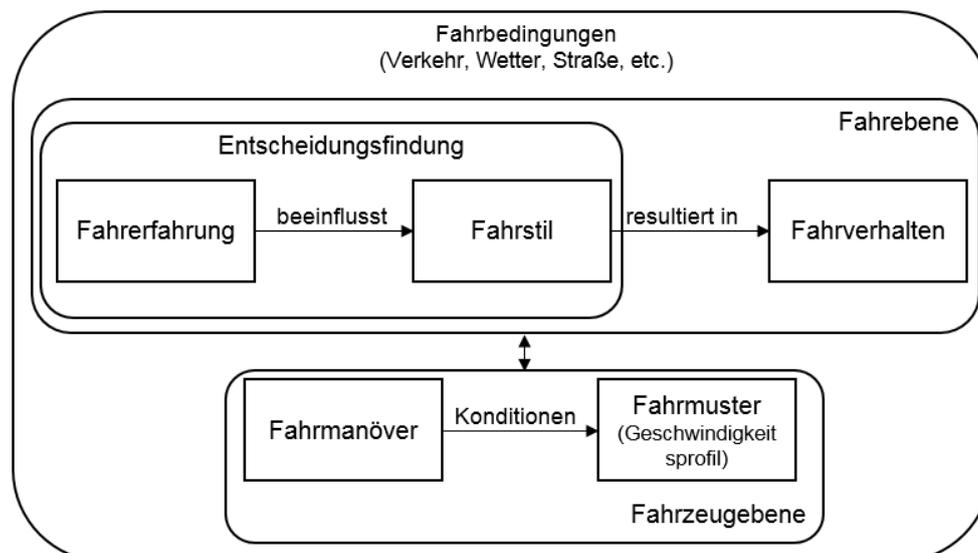


Abbildung 2.7: Fahrstilbezogene Terminologie und Verbindungen [31, S. 667]

Damit ein Fahrstil bestimmt werden kann, sind verschiedene Bewertungsgrößen je nach Fahr-situation nötig. Unterschieden wird zwischen Stadtverkehr, Landstraße und Autobahn. In Tabelle 2.3 sind die Bewertungsgrößen für die Fahrerklassifikation nach SCHULZ et al. [28] aufgeführt.

Tabelle 2.7: Bewertungsgrößen für die Fahrerklassifikation nach analysierter Fahrsituation [28, S. 1126]

Stadtverkehr	Landstraße	Autobahn
Verzögerung	Verzögerung	Verzögerung
Beschleunigung	Beschleunigung	Beschleunigung
(Geschwindigkeits- überschreitung)	Zeitlücke	Zeitlücke
	Querbeschleunigung	Geschwindigkeit
	Geschwindigkeit	

Die Fahraufgabe lässt sich in drei Ebenen, der Stabilisierung, Führung und Navigation, unterteilen. Die Stabilisierung basiert auf der Fähigkeit das Fahrzeug sicher im Straßenverkehr zu Führen. Das Fahrzeug muss im Bereich der Querverführung durch Lenken in dem Fahrstreifen gehalten werden. Bei der Längsführung ist die richtige Wahl der Fahrgeschwindigkeit von Bedeutung. Zusätzlich ergeben sich Anforderungen aus der Führungsebene an die Ausführung von Fahrmanövern im Bereich der richtigen Richtungsführung und Navigation [16, S. 9]. Die drei Ebenen stehen in einer Beziehung zueinander. Die Navigation gibt die geplante Route an die Führungsebene ab, welche die Trajektorie und die gewünschte Geschwindigkeit an die Stabilisierungsebene übergibt (Abbildung 2.8) [32, S. 14].

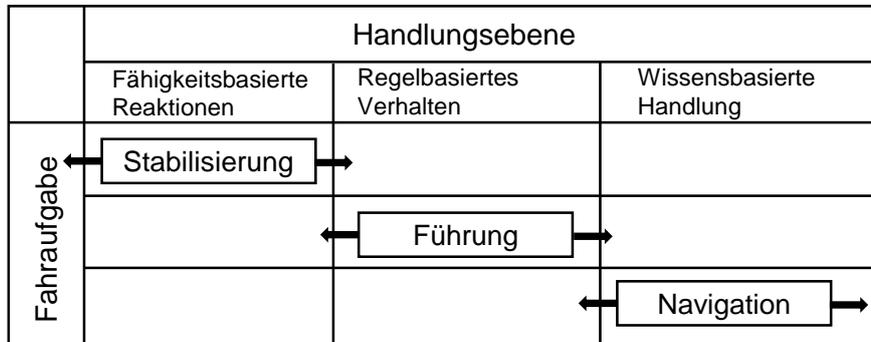


Abbildung 2.8: drei Ebenen der Fahraufgabe und die Zuordnung zur dort wichtigen Handlungsebene [16]

BÜYÜKYILDIZ et al. [29, S. 250] teilen die Entstehung eines Fahrstils in zwei Module auf. In dem ersten Modul werden Kennwerte wie die longitudinale und laterale Beschleunigung und die Geschwindigkeit des Fahrzeugs bestimmt. Im zweiten Modul ist die Umgebung des Fahrzeugs dokumentiert. Durch Kombination der beiden Bausteine lässt sich ein Fahrstil beschreiben. Die Unterscheidung erfolgt in defensiv, neutral und offensiv. Fahrer mit einem offensiven Fahrstil weisen gleichzeitig eine höhere laterale und longitudinale Geschwindigkeit auf. Wie in Abbildung 2.9 zu erkennen ist, fällt die Querbeschleunigung bei hohen Geschwindigkeiten ab. Ebenso stehen Längs- und Querbeschleunigung in einer direkten Beziehung zueinander. [33, S. 836]

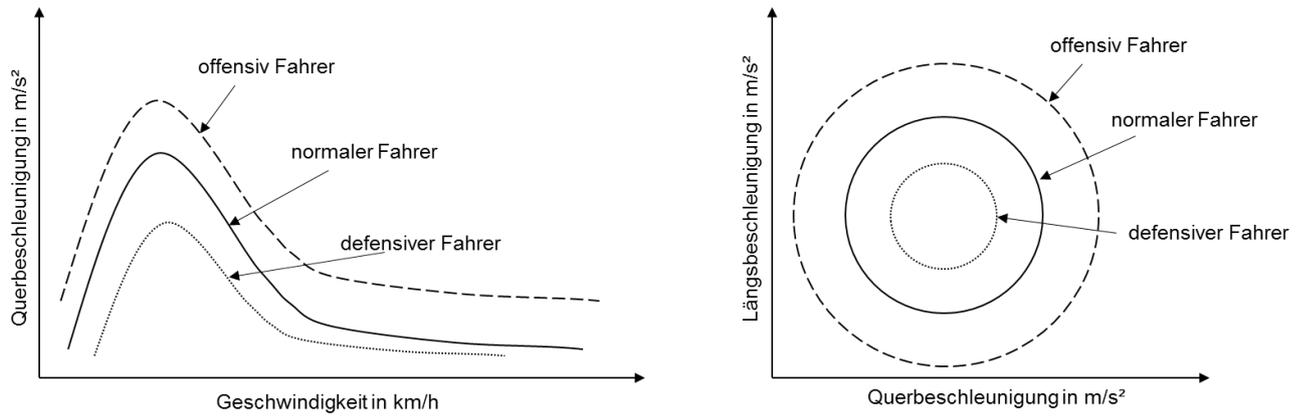


Abbildung 2.9: Grenzmuster aus der Korrelation von Längsbeschleunigung und Fahrzeuggeschwindigkeit und der Ausnutzung des Kamm'schen Reibkreises [34, S. 228]

ELBANHAWI et al. [35, S. 5] definieren als Einflussgrößen auf den Komfort eines autonomen Fahrzeugs die Natürlichkeit eines Manövers, die Unterbrechungen des Fahrflusses, das Sicherheitsempfinden und die Motion Sickness des Fahrers. Außerdem gelten wie bei einem Fahrzeug ohne Automatisierung die Temperatur, die Luftqualität, das Geräuschniveau und Vibrationen und Beschleunigung.

Wie in Abbildung 2.10 dargestellt wird, weist ein Fahrer mit einem aggressiven Fahrstil auch Situationen auf, in denen dessen Fahrstil nicht aggressiv ist. Im Gegenzug dazu fährt ein defensiver Fahrer auch in bestimmten Situationen aggressiv. Ein aggressiver Fahrer kann auch, wie in Abbildung 2.10 in den Bereichen A-D, vor einer Kurve einen normalen bis defensiven Fahrstil aufweisen. Bei Einfahrt der Kurve ist der Fahrstil jedoch wieder aggressiv. Ein defensiver Fahrer zeigt auf gerader Strecke auch aggressives Verhalten (Abbildung 2.10 – Bereich F). [36, S. 27]

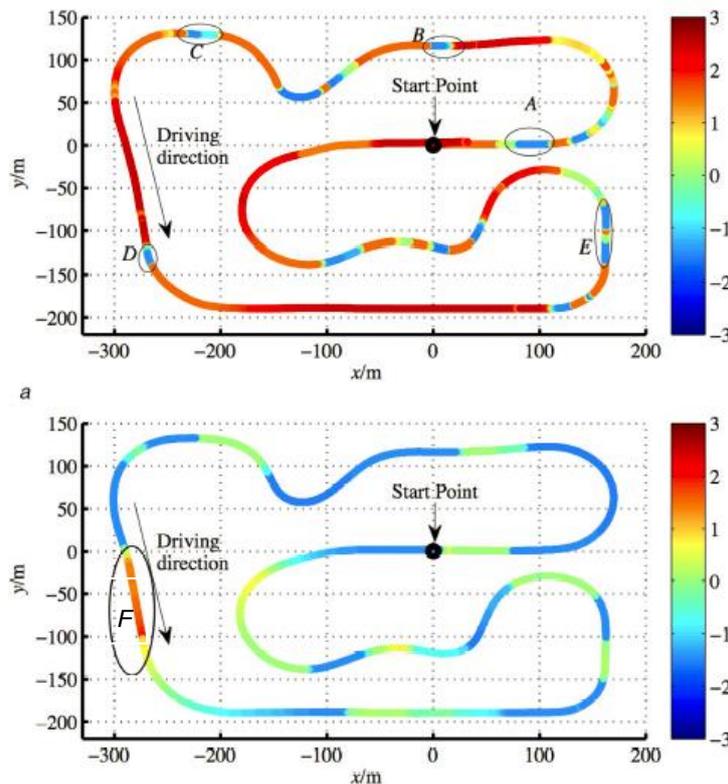


Abbildung 2.10: oben: aggressiver Fahrstil, unten: defensiver Fahrstil auf einer vorgegebenen Strecke. defensiv: -3, normal: 0, aggressiv: 3 [36, S. 27]

SCHULZ et al. [28, S. 1126] betrachten bei verschiedenen Kurven und Kreisfahrten die akzeptierte Querbesehleunigung eines sportlichen, eines normalen und eines ruhigen Fahrertypen. Die Querbesehleunigung in einer Kurve ist bei einem sportlichen Fahrer höher, als bei einem normalen oder ruhigen Fahrer. Jedoch gibt es teilweise Überschneidungen. Es besteht ein Zusammenhang zwischen Querbesehleunigung, Fahrertyp und Kurvenradius (Abbildung 2.11).

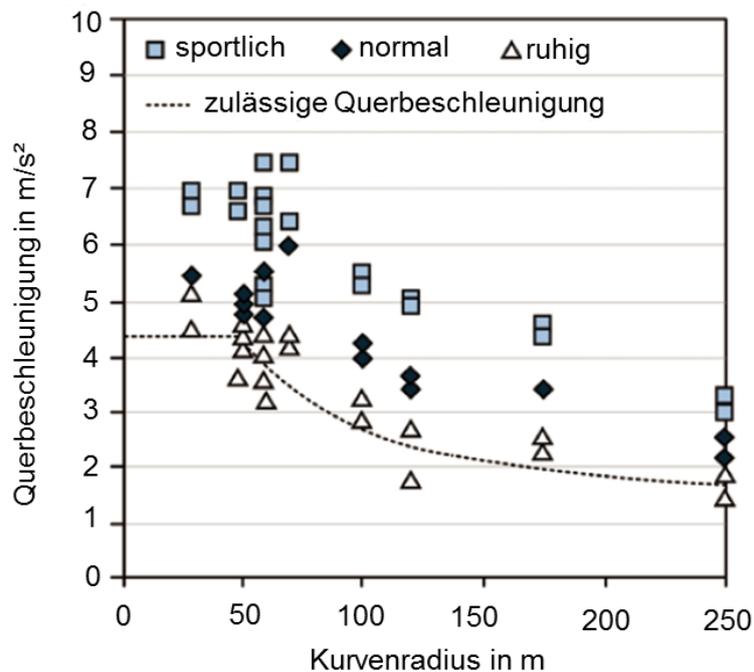


Abbildung 2.11: Akzeptierte Querbesehleunigung unterschiedlicher Fahrertypen [28, S. 1128]

MAYSER [37, S. 3] nimmt eine Fahrertypisierung auf Grundlage von Messdaten vor, die sich aus Geschwindigkeits- und Querbesehleunigungsprofilen von Verfolgungsfahrten ableiten lässt. Dabei werden folgende statistische Messdaten verwendet, da Absolutwerte von der Streckencharakteristik abhängig sind:

- maximale Längsbesehleunigung
- maximale Längsverzögerung
- maximale Querbesehleunigung
- maximale resultierende Besehleunigung
- kumulierte Geschwindigkeitsdifferenz über die Messstrecke

Bei der Einteilung der Fahrertypen erfolgt eine Einteilung von gelassen (1) bis dynamisch (6). Es ist bei der Längs- und bei der Querbesehleunigung zu erkennen, dass ein dynamischer Fahrer höhere Besehleunigungswerte als ein gelassener Fahrer aufweist (Abbildung 2.12).

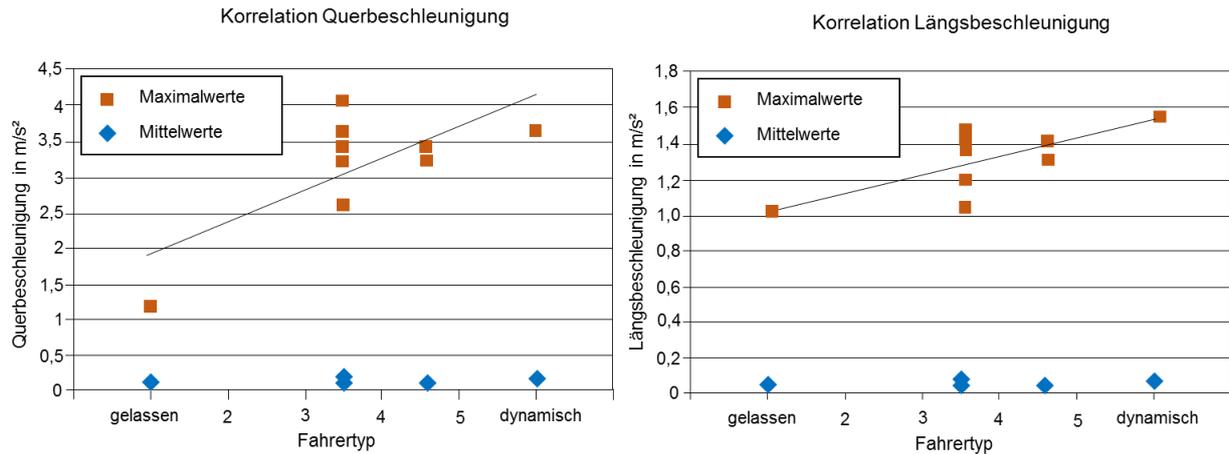


Abbildung 2.12: Korrelation zwischen Messdaten und Fahrertyp [37, S. 4]

KARJANTO et al. [30, S. 2] definieren die Beschleunigungsbereiche eines Fahrzeugs. Die Längsbeschleunigung wird aus 821 Versuchen bestimmt, wobei die Querbeschleunigung abhängig vom Radius einer Kurve oder eines Kreisverkehrs ist. Als Vergleichsfahrzeug wird ein innerstädtischer Zug herangezogen, da hier, wie bei einem autonomen Fahrzeug, die Beschleunigungen auf Insassen wirken, die nicht die Fahraufgabe selbst ausführen (Tabelle 2.8).

Tabelle 2.8: longitudinale und laterale Beschleunigungen für einen Zug und ein Auto [30, S. 3]

	Straßenbahn	Typischer menschlicher Fahrer	Oberes Limit menschlicher Fahrer
Longitudinale Beschleunigung	1,34 m/s ² oder 0,14 g	2,47 m/s ² oder 0,25 g	4,86 m/s ² oder 0,5 g
Longitudinale Verzögerung	-1,34 m/s ² oder 0,14 g	-3,27 m/s ² oder -0,33 g	-7,47 m/s ² oder 0,76 g
Laterale Beschleunigung	1,47 m/s ² oder 0,15 g	4,10 m/s ² oder 0,42 g	5,30 m/s ² oder 0,54 g

Bestimmte Beschleunigungen lassen sich dabei bestimmten Fahrstilen zuordnen, welche in einen defensiven, einen normalen und einen aggressiven Bereich unterteilt werden (Abbildung 2.11) [30, S. 5].

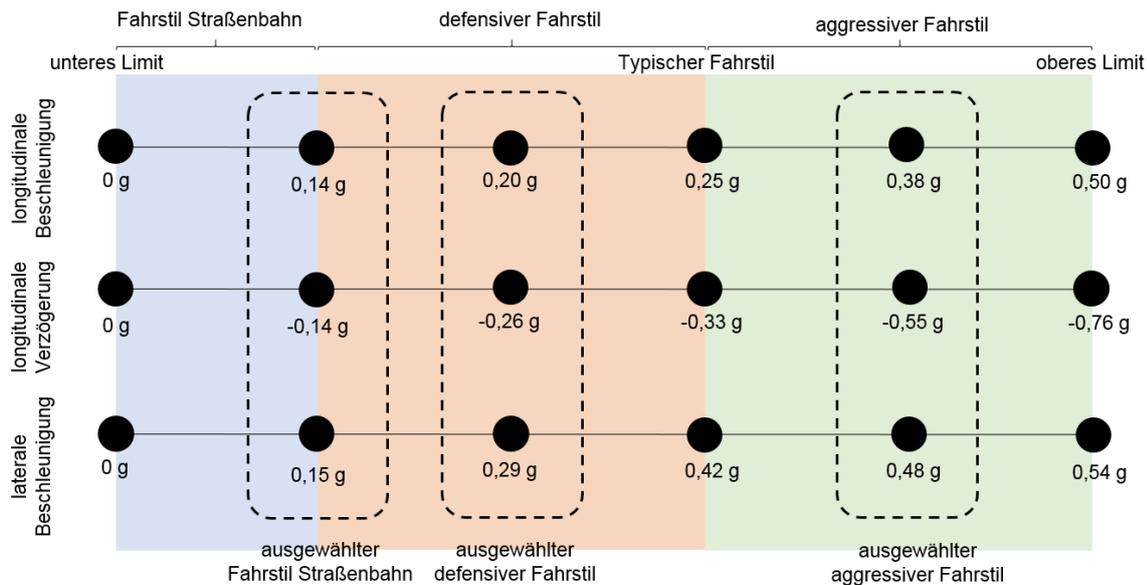


Abbildung 2.13: Bereiche für einen defensiven, normalen und aggressiven Fahrstil für laterale und longitudinale Beschleunigung [30, S. 5]

HUGEMANN et al. [38, S. 4] betrachten die lateralen und longitudinalen Beschleunigungen im normalen Fahrbetrieb. Keinen Unterschied macht ob das Fahrzeug eine Links- oder Rechtskurve durchfährt, obwohl der Kurvenradius bauartbedingt in einer Linkskurve größer ist als in einer Rechtskurve. Betrachtet man eine Autobahn, so sinken die lateralen Beschleunigungen ab, desto mehr Fahrstreifen in eine Richtung vorhanden sind. Ebenso steigen die lateralen Beschleunigungen an, wenn sich eine Autobahn in einem bergigen Gebiet befindet. Auf dieser Grundlage definieren XU et al. [39] die in Tabelle 2.9 dargestellten Komfortwerte für das Empfinden des Fahrers auf Basis der lateralen Beschleunigung.

Tabelle 2.9: Komfortwerte auf Grundlage der lateralen Beschleunigung [39, S. 5]

Komfort	niedrig	medium	hoch
Laterale Beschleunigung	1,8 m/s ²	3,6 m/s ²	5,0 m/s ²

Der Fahrstil eines automatisierten Fahrzeugs lässt sich abschließend nicht auf eine bestimmte Größe festlegen. Fahrer beispielsweise, die im manuellen Fahrbetrieb hohe Querschleunigungen und geringe Sicherheitsabstände zu vorausfahrenden Fahrzeugen aufweisen, präferieren auch ein automatisiertes Fahrzeug, das diese Eigenschaften aufweist. Ein Fahrstil ist neben Umweltbedingungen, wie Wetter und Straßenverhältnisse, auch von menschlichen Faktoren, wie der persönlichen Verhaltensweise, abhängig. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass eine Automationsauslegung ähnlich dem eigenen Fahrstil als angenehm empfunden wird. [40, S. 78]

Neben den in der Literatur beschriebenen Wertebereichen werden in Regelwerken Grenzwerte für das System und die damit verbundenen Beschleunigungen festgelegt.

Die Thematik der Reglementierung automatisierter Fahrzeuge wird in der aktuellen Entwicklung und Forschung von Fahrfunktionen von verschiedenen Institutionen behandelt. Es gibt verschiedene Ansätze, wie das Fahrverhalten eines Fahrzeugs bzw. eines Fahrers bewertet werden kann.

Die UNECE R79 „Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to steering equipment“ [41, S. 3] befasst sich mit der Reglementierung von Lenkeinrichtungen bei einem Fahrzeug.

Lateraler Ruck nach der UNECE R79

Der maximale laterale Ruck eines Fahrzeugs darf über einen zeitlichen Durchschnitt von 0,5 s nicht größer als 5 m/s^3 sein [41, S. 24].

Ebenso ist die ISO 15622 „Adaptive cruise control systems – Performance requirements and test procedures“ relevant [42, S. 1] für Fahrzeuge mit Fahrerassistenzsysteme relevant. Darin werden Standards für ein ACC-System und eine Lenkeinrichtung definiert, die für die Typzulassung eines autonomen Fahrzeugs notwendig sind. Für die Beurteilung werden gleitende Mittelwerte der Beschleunigungen und des Rucks herangezogen.

Longitudinale Beschleunigung nach der ISO 15622

Die longitudinale Beschleunigung darf in einem Zeitraum von 2 s eine durchschnittliche Beschleunigung von 2 m/s^2 bei einer maximalen Geschwindigkeit von 5 m/s^2 haben. Fährt das Fahrzeug hingegen Geschwindigkeiten über 20 m/s^2 ist eine Längsverzögerung nur bis 2 m/s^2 erlaubt. (Abbildung 2.14) [42]

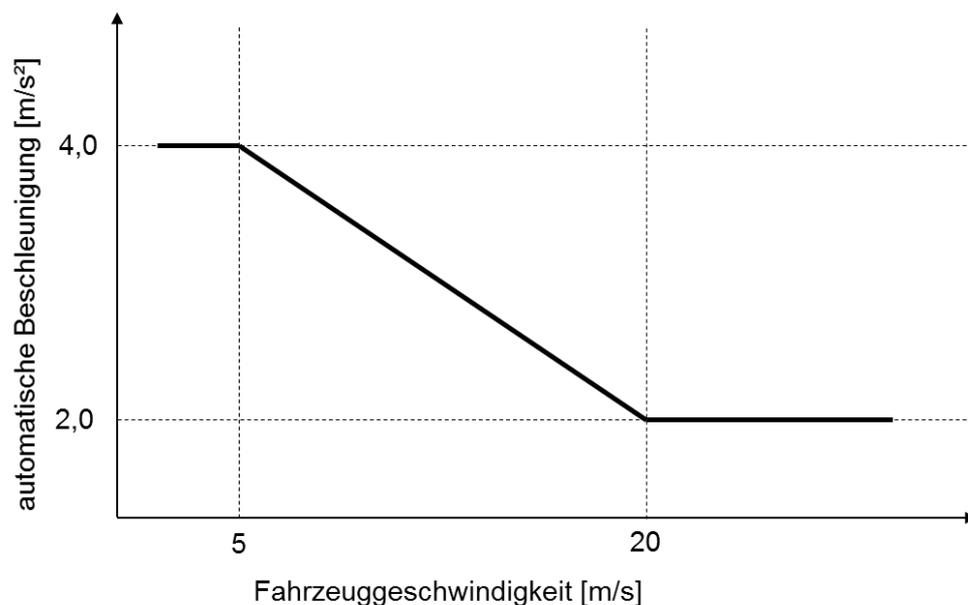


Abbildung 2.14: Grenzwert longitudinale Beschleunigung in der ISO15622 [42]

Longitudinale Verzögerung nach der ISO 15622

Die longitudinale Verzögerung darf bei einer Geschwindigkeit unter 5 m/s über einen Zeitraum von 2 s durchschnittlich nicht über einen mittleren Wert von 5 m/s^2 kommen. Bei einer Geschwindigkeit von 20 m/s darf die Verzögerung nicht über $3,5 \text{ m/s}^2$ sein. (Abbildung 2.15) [42]

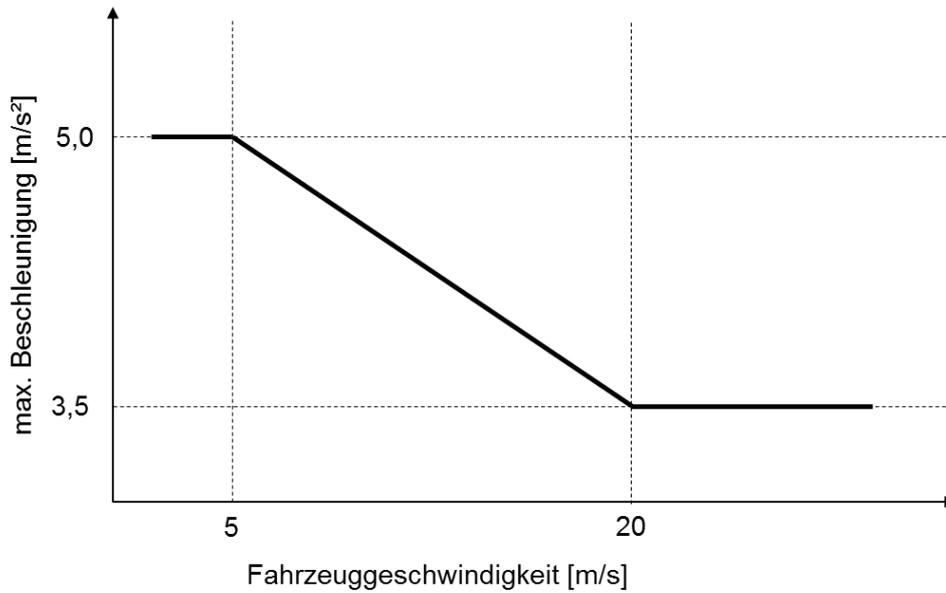


Abbildung 2.15: Grenzwert longitudinale Verzögerung in der ISO15622 [42]

Longitudinaler Ruck nach der ISO 15622

Der longitudinale Ruck bei einer Verzögerung darf bei einer Geschwindigkeit unter 5 m/s in einem Durchschnitt über 1 s nicht höher als 5 m/s³ sein. Bei Geschwindigkeiten über 20 m/s ist der Grenzwert auf 2,5 m/s³ beschränkt. (Abbildung 2.16) [42]

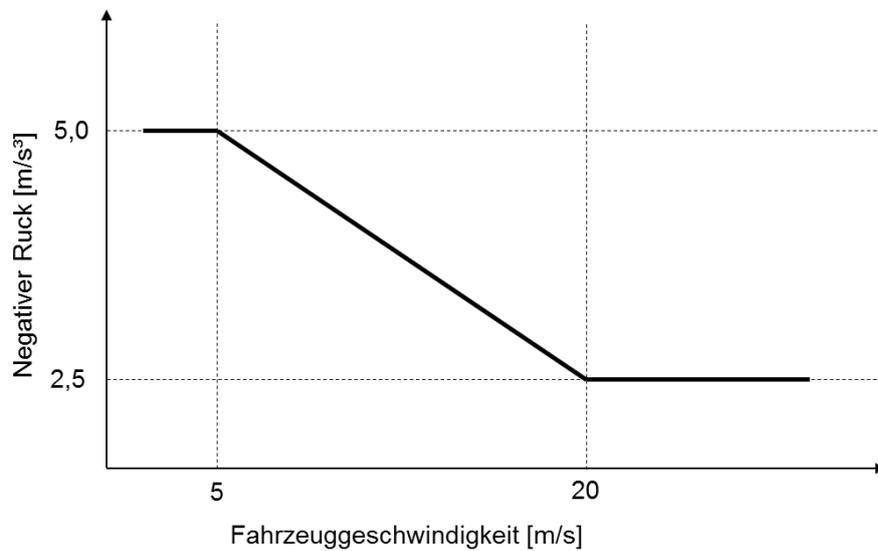


Abbildung 2.16: Grenzwerte longitudinaler Ruck in der ISO 15622 [42]

2.6 Szenarien zur Bewertung von Fahrern und automatisierten Fahrzeugen

HOLZINGER et al. [22, S. 19] definieren Situationen, die ein Abstandsregeltempomat (ACC) erkennen und ausführen muss. Die ACC-Fahrzustände sind folgendermaßen bestimmt:

Tabelle 2.10: Automatisch erkannte ACC-Fahrzustände [22, S. 19]

ACC-Fahrzustand	Beschreibung
Folgefahrt konstant	Vorausfahrzeug fährt mit konstanter Geschwindigkeit
Beschleunigung bei Folgefahrt	Vorausfahrzeug beschleunigt
Verzögerung bei Folgefahrt	Vorausfahrzeug verzögert bzw. bremst
Anhalten bei Folgefahrt	Vorausfahrzeug hält an
Anfahren bei Folgefahrt	Vorausfahrzeug fährt an
Einscheren bei Folgefahrt	Ein Fahrzeug drängt sich in den Zwischenraum zwischen meinem (alten) Vorausfahrzeug (→ neues Vorausfahrzeug)
Ausscheren bei Folgefahrt	Mein Vorausfahrzeug verlässt den Fahrstreifen (z.B. Abbiegen) oder ich wechsele den Fahrstreifen
Auffahren auf langsames Fahrzeug	Das Eigenfahrzeug nähert sich einem langsameren neueren Vorausfahrzeug an und verzögert

ERSOY et al. [43, S. 174] bestimmen in der Praxis gebräuchliche Manöver. In den einzelnen Manövern werden Lenkwinkelamplitude, -frequenz, Beschleunigung und Verzögerung, sowie die Fahrgeschwindigkeit variiert. Die Manöver werden dahingehend beschrieben, ob sie das subjektive oder objektive Fahrempfinden bewerten. Die Manöver werden in folgende Kategorien eingeteilt:

- Freie Fahrt
- Geradeausfahrt
- Kreisfahrt
- Sinusförmiges Lenken
- Wechsellenken
- Lenkwinkelsprung
- Lenkimpulse

NAGEL [44, S. 193] beschreibt Fahrmanöver dahingehend, dass ein Fahrzeug zu einem Zeitpunkt nur ein Fahrmanöver ausführen kann. Beispielsweise hat das Manövers Fahren auf einer Autobahn die Verkettung mehrerer Manöver zur Folge. Das Startsymbol ist *Fahrzeug fahren*. Die beiden Elemente *Fahrt starten* und *Fahren zur Autobahn* werden nicht weiter zerlegt. Das komplexe Manöver Fahren auf der Autobahn wird jedoch in die drei Subsequenzen *Auffahren*, *Fahren* und *Abfahren von der Autobahn* unterteilt. Das *Fahren bis zum Ziel* und *Beenden der Fahrt*, wird in diesem Fall nicht weiter definiert. Eine detaillierte Beschreibung folgt in einer eigenen Beschreibung des Manövers.

Die einzelnen Subsequenzen lassen sich weiter unterteilen, woraus sich einzelne Situationen ergeben, die das Fahrzeug ausführen muss. Lässt sich eine Sequenz nicht weiter unterteilen, stellt diese die unterste Ebene dar und damit die Situation für das Fahrzeug.

NAGEL et al. [17, S. 205] beschreiben die relevanten Aspekte des Fahrens eines Fahrzeugs auf öffentlichen Straßen mit einer vier-Ebenen-Hierarchie mit den Bestandteilen Mission Master, Navigation, Maneuver und Control.

In der Ebene Maneuver sind Situationen hinterlegt, die nötig sind, um eine vorgegebene Fahrstrecke zu bewältigen. Beispiele sind:

- Auffahren auf einen Parkplatz
- Abfahren von einem Parkplatz
- Hindernis umfahren
- Anhalten am rechten Fahrbahnrand

Das Forschungsprojekt zur Etablierung von generell akzeptierten Gütekriterien, Werkzeugen und Methoden sowie Szenarien und Situationen zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen (PEGASUS) hat das Ziel die Lücke im Bereich des Testens bis hin zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen zu schließen. [11]

Das Projekt ist in vier einzelne Teilprojekte aufgeteilt. Das erste Teilprojekt befasst sich mit der Szenarienanalyse und den Qualitätsmaßen. Dabei ist zu klären, was die menschliche und maschinelle Leistungsfähigkeit im Anwendungsfall sind und inwiefern die maschinelle Fähigkeit akzeptiert wird. Ebenso ist es Teil dieses Abschnitts zu definieren, welche Kriterien und Maße sich aus den Erkenntnissen abklären lassen. Im zweiten Teilprojekt geht es um Prozesse zur Umsetzung der Erkenntnisse und welche Werkzeuge und Methoden dafür erforderlich sind. Der dritte Abschnitt handelt vom Testen, wozu geklärt werden muss, ob die Vollständigkeit der relevanten Testfälle und dessen Kriterien und Maße sichergestellt sind. Ebenso wird definiert, was mittels Simulation und was auf dem Prüfgelände getestet wird. Als vierter Teil folgt die Ergebnisreflektion und Einbettung, ob das Konzept stimmig ist und wie die Einbettung gelingt [45].

Eine weitere Möglichkeit zur Bewertung von Fahraufgaben ist die Führerscheinprüfung. In der aktuellen Prüfungsrichtlinie zur Führerscheinprüfung [46] sind Fahrmanöver festgelegt, die in der praktischen Fahrprüfung gefordert werden. In der praktischen Fahrprüfung werden Situationen folgender Themengebiete betrachtet:

- Verhalten beim Anfahren
- Steigung und Gefällestrecken
- Beachtung von Verkehrszeichen & -einrichtungen
- Fahrgeschwindigkeit

- Abstand halten vom vorausfahrenden Fahrzeug
- Überholen und Vorbeifahren
- Abbiegen und Fahrstreifenwechsel
- Verhalten an Kreuzungen, Einmündungen, Kreisverkehren und Bahnübergängen
- Verhalten gegenüber Fußgängern und sowie an Haltestellen
- Fahren außerhalb geschlossener Ortschaften

Erweitert werden diese Themengebiete durch Grundfahraufgaben. Zur Beurteilung der Prüfungsfahrt wird ein Bewertungsbogen herangezogen, der auf das Fahrverhalten bezüglich der Einhaltung der Regeln und des Fahrstils eingeht [46, S. 69]. Die theoretische Prüfung umfasst Situationen, deren Auftreten in der praktischen Prüfung eher unwahrscheinlich, jedoch auch wichtig für die grundsätzliche sichere Führung eines Fahrzeugs sind. Als Grundlage für die Überprüfung des regelkonformen Fahrens in der Führerscheinrichtlinie dient die Straßenverkehrsordnung [47].

Ebenso wird das Verhalten eines Fahrers in einem Fahrsicherheitstraining bewertet. Es werden verschiedene Situationen aus dem Straßenverkehr nachgebildet und überprüft. Ein Training zielt darauf ab, dass Fahrtechniken eingeübt werden, mit denen kritische Situationen besser bewältigt werden können [48]. Es wird das Verhalten des Fahrers/Fahrzeugs analysiert, wie beispielsweise auf rutschiger Fahrbahn gebremst oder Hindernissen ausgewichen wird [49, 50].

2.7 Ableitung offener Fragen aus dem Stand der Technik

Aus dem Stand der Technik lassen sich offene Forschungsfragen ableiten. Aktuell gibt es verschiedene Ansätze um die Zahl an möglichen Verkehrsszenarien begründet zu verringern. Eine allgemeingültige ideale Lösung wurde jedoch noch nicht gefunden. Eine Option besteht in der objektiven Charakterisierung des Fahrverhaltens. Verschiedene Verfahren, wie beispielsweise auch die Prüfungsrichtlinie für den Führerschein geben einen Ansatz zur Bewertung eines menschlichen Fahrers. Idealerweise kann dieses Vorgehen auf eine automatisierte Fahrfunktion übertragen werden. Im ersten Schritt müssen verschiedene Ansätze zur Überprüfung von Fahraufgaben geordnet und kombiniert werden. Daraus relevante Szenarien müssen übertragen, an die Aufgabenstellung angepasst und geordnet werden. Es muss eine Vorgehensweise entwickelt werden, womit Testszenarien einheitlich verglichen werden können. Ebenso soll betrachtet werden, ob Kenngrößen aus verschiedenen Richtlinien und Standards zur Bewertung einer automatisierten Fahrfunktion herangezogen werden.

Eine Bewertung des Fahrstils eines Fahrers erfolgt derzeit in der Literatur anhand von festgelegten Kennwerten. Es wird jedoch kaum der Fahrstil eines automatisierten Fahrzeugs betrachtet, der durch die Fahrzeuginsassen anders wahrgenommen werden kann. Mit einem methodischen Vorgehensmodell sollen die Fähigkeiten eines automatisierten Fahrzeugs durch festgelegte Szenarien objektiv in Bezug auf die Sicherheit, den Fahrstil, den Fahrkomfort und die Regelkonformität bewerten und vergleichbar gemacht werden.

3 Modell zur objektiven Charakterisierung des Fahrverhaltens

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise beschrieben, mit der Szenarien für eine objektive Fahrverhaltenscharakterisierung bestimmt werden können. Aus dem Stand der Technik lassen sich bestimmte funktionale Szenarien ableiten, die für die Bewertung des Fahrverhaltens verwendet werden können. Diesen werden Parameter und Kennwerte zugeordnet. Anschließend erfolgt die Unterteilung in den entsprechenden Anwendungszweck. Daraus werden Parametervariationen simuliert. Die konkreten Ergebnisse werden für die Bewertung verwendet. Daraus lassen sich Schwachstellen ableiten und Szenarien passen. (Abbildung 3.1)

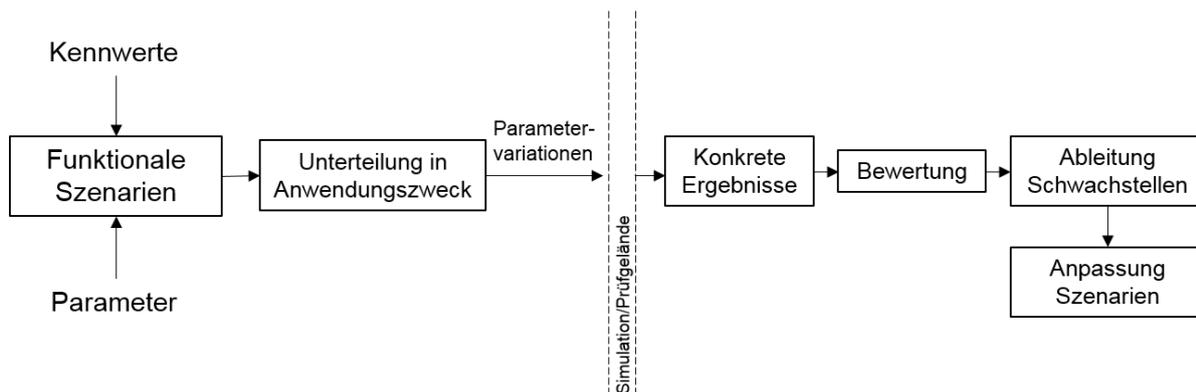


Abbildung 3.1: Kurzmodell zum Vorgehen im dritten Kapitel

3.1 Bestimmung relevanter Szenarien

Für die Bewertung von Fahraufgaben und -verhalten werden in Kapitel 2.5 verschiedene Ansätze beschrieben. Im ersten Schritt erfolgt hierfür eine Bestimmung der relevanten Szenarien. Für die grundsätzliche Ermittlung der Szenarien werden neben der Literatur auch die Führerscheinrichtlinie und Manöver aus Fahrsicherheitstrainings herangezogen.

Die relevanten Szenarien werden zunächst in Autobahn- und Überlandverkehr, in Stadtverkehr sowie in Situationen, die sowohl innerorts als auch außerorts auftreten können, unterteilt. Im nächsten Schritt erfolgt die Unterscheidung der Fahrumgebungen dahingehend, ob die grundsätzliche Fahrzeugführung in Längs- bzw. Querrichtung stattfindet (Abbildung 3.2).

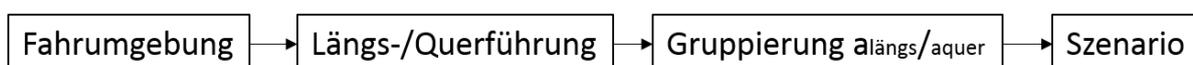


Abbildung 3.2: Vorgehen zur Einteilung der Szenarien in Längs- und Querführung

Die Beschleunigung hat hier entweder keinen, einen konstanten, transienten oder periodischen Verlauf. Durch die Einteilung des Beschleunigungsverlaufs kann ein Szenario gezielt eingeordnet werden. Beispielsweise kann ein Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit fahren, wenn die Längsführung null ist. Den letzten Schritt stellt die Zuordnung der relevanten funktionalen Szenarien aus der Führerscheinrichtlinie, dem Fahrsicherheitstraining und der Literatur dar (Abbildung 3.3).

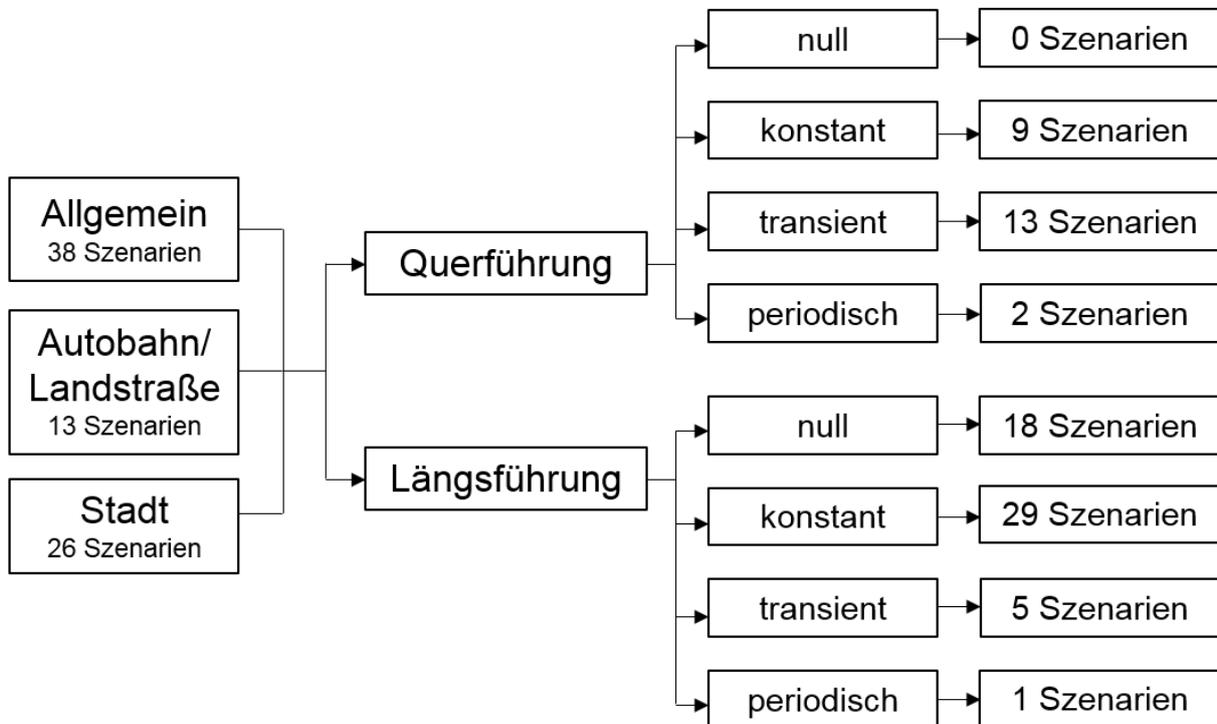


Abbildung 3.3: Einordnung der Szenarien in die Längs- und Querführung

Zunächst werden die funktionalen Szenarien aus der praktischen Führerscheinprüfung eingeordnet. Anschließend folgen Szenarien aus der theoretischen Prüfung. Darauf folgen Manöver, die in Fahrsicherheitstrainings durchgeführt und bewertet werden. Abschließend werden funktionale Szenarien aus der Literatur abgeleitet und eingeordnet.

3.1.1 Praktische Führerscheinprüfung

In der Führerscheinrichtlinie [46] wird das Prüfverfahren, um eine Erlaubnis zum Führen eines Kraftfahrzeugs zu erlangen, festgelegt. In der theoretischen Führerscheinprüfung werden unter anderem grundlegende Fragen zum Führen eines Fahrzeugs überprüft. Die Szenarien, die in der Praxisprüfung gefahren werden können, lassen sich in vier verschiedene Kategorien einteilen. Die erste Kategorie bilden die Grundfahraufgaben zum Führen eines Fahrzeugs. Als nächstes folgt das Überholen und Vorbeifahren. Ein weiterer Bestandteil ist das sichere Führen eines Fahrzeugs insbesondere innerorts. Des Weiteren lassen sich aus den Anforderungen an einen Prüfungsort relevante Szenarien ableiten.

Für die praktische Prüfungsfahrt gelten Anforderungen, wie beispielsweise die Sicherheitskontrolle vor der Abfahrt, die Lenkradhaltung oder auch das Anfahren am Berg, die für die objektive Fahrverhaltenscharakterisierung nicht von Bedeutung sind. Die erste Kategorie bilden Situationen, die für das grundsätzliche Führen eines Fahrzeugs nötig sind. Die Einordnung der

Szenarien erfolgt nach der in der Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3 dargestellten Vorgehensweise (Tabelle 3.1).

Tabelle 3.1: praktische Führerscheinprüfung - Grundfahraufgaben zum Führung eines Fahrzeugs [46, S. 20]

Szenario	Umgebung	primäre Fahrzeugführung	Einordnung
Erkennen von Verkehrszeichen und -einrichtungen	allgemein	Längsführung	null
Steigung und Gefällestrecken	allgemein	Längsführung	null
Fahrgeschwindigkeit an Verkehrslage anpassen	allgemein	Längsführung	null
Abstand halten vom vorausfahrenden Fahrzeug	allgemein	Längsführung	konstant
Vorausschauendes Fahren	allgemein	Längsführung	null

Die nächste Kategorie bilden Szenarien, bei denen ein Überholvorgang durchgeführt wird. Dazu zählen auch Anforderungen an das Verhalten des Fahrers beim Überholtwerden und auch beim Vorbeifahren an parkenden und haltenden Fahrzeugen und Hindernissen (Tabelle 3.2).

Tabelle 3.2: praktische Führerscheinprüfung - Überholen und Vorbeifahren [46, S. 21]

Szenario	Umgebung	primäre Fahrzeugführung	Einordnung
Überholen	Autobahn	Längsführung	konstant
Überholtwerden	Autobahn	Längsführung	null
Vorbeifahren	Stadt	Längsführung	null

Die folgende Gruppe bilden Situationen, die typischerweise innerorts auftreten, wie Vorfahrtsregelungen, das richtige Verhalten an Haltestellen und gegenüber Fußgängern (Tabelle 3.3).

Tabelle 3.3: praktische Führerscheinprüfung - Fahren innerorts [46, S. 22]

Szenario	Umgebung	primäre Fahrzeugführung	Einordnung
Verhalten an Kreuzungen, Einmündungen, Kreisverkehren und Bahnübergängen	Stadt	Längsführung	transient
Abbiegen	Stadt	Querführung	konstant
Verhalten gegenüber Fußgängern	Stadt	Längsführung	konstant
Verhalten an Haltestellen öffentlicher Verkehrsmittel	Stadt	Längsführung	null

In der Richtlinie sind Anforderungen an den Prüfungsort und seine Umgebung festgelegt. Daraus leiten sich Situationen ab, die nicht in den vorherigen Kategorien auftreten, aber auch zum Abprüfen von Szenarien aus diesen Kategorien notwendig sind (Tabelle 3.4).

Tabelle 3.4: praktische Führerscheinprüfung - Szenarien, die sich aus den Anforderungen an den Prüfungsort und seine Umgebung ableiten [46, S. 25]

Szenario	Umgebung	primäre Fahrzeugführung	Einordnung
Richtige Fahrbahnbenutzung	allgemein	Längsführung	null
Anfahren in fließenden Verkehr vom Fahrbahnrand aus	Stadt	Längsführung	transient
Einfahren in Vorfahrtsstraßen	Stadt	Querführung	transient
Befahren von Kreuzungen mit Stoppschild	Stadt	Längsführung	konstant
Befahren von Kreuzungen mit Lichtzeichen	Stadt	Längsführung	konstant
Linksabbiegen auf Fahrbahnen mit Gegenverkehr	Stadt	Querführung	transient
Regelkonformer Fahrstreifenwechsel	Autobahn	Querführung	konstant
Befahren von Kreuzungen mit abknickender Vorfahrt	Stadt	Querführung	konstant
Rechts-/Links-Abbiegen unter besonderer Berücksichtigung von Radfahrern auf Radwegen oder Seitenstreifen	Stadt	Querführung	transient

3.1.2 theoretische Führerscheinprüfung

Neben grundlegenden Fragen zum Führen eines Fahrzeugs werden in der theoretischen Führerscheinprüfung auch Szenarien überprüft, deren Auftreten in der praktischen Prüfung eher unwahrscheinlich ist. Dazu zählen sowohl Szenarien, die für das sichere Führen eines Fahrzeugs wichtig sind, aber auch die Handlungsweise an diversen Verkehrsschildern. Die Szenarien aus der theoretischen Führerscheinprüfung lassen sich ebenso in drei Bereiche einteilen. Die erste Gruppe bilden Szenarien, die innerorts auftreten können. Darauf folgt das regelkonforme Verhalten. Den dritten Bereich bilden Situationen, die teilweise unter gefährlichen Bedingungen auftreten können und ein sicheres Handeln des Fahrzeugführers verlangen.

Zu Szenarien, die besonders innerorts auftreten, gehören auch solche, bei denen sich Fußgänger oder Radfahrer falsch verhalten und ein schnelles Handeln des Fahrzeugführers verlangen (Tabelle 3.5).

Tabelle 3.5: theoretische Führerscheinprüfung - innerorts [51]

Szenario	Umgebung	primäre Fahrzeugführung	Einordnung
Fußgänger/Radfahrer von links/rechts überquert Fahrbahn	Stadt	Längsführung	konstant
Fußgänger/Radfahrer überquert Fußgängerüberweg trotz roter Ampel	Stadt	Längsführung	konstant
Radfahrer schert vor dem Fahrzeug ein	Stadt	Längsführung	konstant
Objekt befindet sich auf der Fahrbahn	Stadt	Längsführung	konstant
Fußgänger/Radfahrer erscheint hinter parkendem Auto	Stadt	Längsführung	konstant
Verhalten gegenüber Radfahrern	Stadt	Querführung	null
Haltestelle von öffentlichen Verkehrsmitteln passieren	Stadt	Längsführung	null

Die nächste Einheit an Szenarien überprüft das regelkonforme Verhalten an Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen nach §45 der Straßenverkehrsordnung [47]. Es werden auch verschiedene Variationen eines Verkehrszeichens, wie beispielsweise „abknickende Vorfahrtsstraße“, oder Regelungen wie „rechts vor links“ abgefragt (Tabelle 3.6).

Tabelle 3.6: theoretische Prüfung - Verkehrszeichen [51]

Szenario	Umgebung	primäre Fahrzeugführung	Einordnung
Verkehrszeichen zum Leiten des Verkehrs	Stadt	Längsführung	null
Regelung des Verkehrs mit und ohne Verkehrszeichen	Stadt	Längsführung	null
Durchfahren einer temporär veränderten Verkehrsführung	Stadt	Längsführung	konstant
Verhalten an Ampeln, Bahnübergängen, Schranken	Stadt	Längsführung	konstant
Sonstige Verkehrszeichen	Stadt	Längsführung	null

Einen dritten Block bilden kritische Szenarien, bei denen ein Fehlverhalten anderer Verkehrsteilnehmer eintritt und dadurch eine Handlung des Fahrers gefordert wird. In diese Sammlung

gehören auch Umwelteinflüsse oder plötzlich auftretende Hindernisse im Überlandverkehr (Tabelle 3.7).

Tabelle 3.7: theoretische Führerscheinprüfung – Handlungsweise in bestimmten Situationen [51]

Szenario	Umgebung	primäre Fahrzeugführung	Einordnung
Fahrzeug überholt trotz Abbiegevorgang	allgemein	Längsführung	transient
Vorausfahrendes Fahrzeug schert durch (Cut through)	Autobahn	Längsführung	konstant
Vorausfahrendes Fahrzeug schert ein (Cut in)	Autobahn	Längsführung	konstant
Vorausfahrender Radfahrer schert ein	Stadt	Längsführung	konstant
Fahrzeug schert auf Landstraße ein	Landstraße	Längsführung	konstant
Wild	Landstraße	Längsführung	konstant
Sicht ist durch Nebel/Regen beeinträchtigt	Landstraße	Längsführung	null
Schneebedeckte Fahrbahn	allgemein	Längsführung	null

3.1.3 Fahrsicherheitstraining

In Fahrsicherheitstrainings wird von einem Fahrer sicheres Handeln abverlangt. Während in der Führerscheinprüfung das grundsätzliche sichere und regelkonforme Führen eines Fahrzeugs abgefragt wird, zielt das Fahrsicherheitstraining auf Manöver ab, deren Auftreten im normalen Straßenverkehr eher nur unter extremen Bedingungen stattfindet. Dabei wird ein schnelles, sicheres Handeln des Fahrzeugführers verlangt. Einige Szenarien aus Fahrsicherheitstrainings lassen sich auf autonome Fahrzeuge übertragen.

Während in der Führerscheinprüfung nur eine Bremsung mit maximaler Verzögerung gefordert wird, zielt ein Fahrsicherheitstraining auf Situationen ab, bei denen das Bremsen des Fahrers kritisch werden kann (Tabelle 3.8).

Tabelle 3.8: Fahrsicherheitstraining – Bremsen und Ausbrechen des Fahrzeugs [52, 53]

Szenario	Umgebung	primäre Fahrzeugführung	Einordnung
Bremsen auf μ -split	allgemein	Längsführung	transient
Bremsen mit maximaler Verzögerung bergab	allgemein	Längsführung	konstant

Bremsen auf μ -low	allgemein	Längsführung	transient
Bremsen in Kurve	allgemein	Querführung	transient
Ausbrechen auf Gerade	allgemein	Querführung	transient
Ausbrechen in Kurve	allgemein	Querführung	transient

In der praktischen Führerscheinprüfung werden Ausweichmanöver nicht überprüft, da ein Auftreten zu unwahrscheinlich ist. Das richtige Verhalten wird nur in der theoretischen Prüfung teilweise abgefragt. Muss ein Fahrzeugführer jedoch in bestimmten Situationen trotzdem ausweichen, ist ein sicheres Führen des Fahrzeugs notwendig (Tabelle 3.9).

Tabelle 3.9: Fahrsicherheitstraining – Ausweichen in verschiedenen Situationen [52, 54]

Szenario	Umgebung	primäre Fahrzeugführung	Einordnung
Ausweichen auf μ -split	allgemein	Querführung	transient
Ausweichen auf μ -low	allgemein	Querführung	transient
Ausweichen mit Bremsen	allgemein	Querführung	konstant
Ausweichen von festen Hindernissen	allgemein	Querführung	transient
Ausweichen von plötzlich auftretenden Hindernissen	allgemein	Querführung	transient

Die dritte Gruppe an Manövern, die in einem Fahrsicherheitstraining durchgeführt werden, betreffen das sichere Verhalten in Kurven. Dabei wird das Augenmerk auf richtiges Einlenkverhalten gelegt (Tabelle 3.9).

Tabelle 3.10: Fahrsicherheitstraining - Kurvenfahrt [53, 55]

Szenario	Umgebung	primäre Fahrzeugführung	Einordnung
Enger werdender Kurvenverlauf	allgemein	Querführung	transient
Slalomfahrt	allgemein	Querführung	transient
Wechselnder Kurvenverlauf	allgemein	Querführung	konstant
Ausbrechen des Fahrzeugs in einer Kurve	allgemein	Querführung	transient

3.1.4 Szenarien aus der Literatur

Wie in Kapitel 2.5 beschrieben wird, bezieht sich die Literatur auf relevante Szenarien, die ein autonomes Fahrzeug bewältigen muss, welche auch für die objektive Fahrverhaltenscharakterisierung angewendet werden können. HOLZINGER et al. [22] beschreiben Zustände für die Überprüfung eines Level 2 ACC-Systems (Tabelle 3.11).

Tabelle 3.11: Situationen eines ACC-Systems [22]

Szenario	Umgebung	primäre Fahrzeugführung	Einordnung
Folgefahrt konstant	allgemein	Längsführung	null
Beschleunigung bei Folgefahrt	allgemein	Längsführung	konstant
Verzögerung bei Folgefahrt	allgemein	Längsführung	konstant
Anhalten bei Folgefahrt	allgemein	Längsführung	konstant
Anfahren bei Folgefahrt	allgemein	Längsführung	konstant
Einscheren bei Folgefahrt	allgemein	Längsführung	konstant
Ausscheren bei Folgefahrt	allgemein	Längsführung	konstant
Auffahren auf langsames Fahrzeug	allgemein	Längsführung	konstant

Aus dem Beitrag von ERSOY et al. [43] lassen sich Szenarien ableiten, die das objektive Verhalten eines Fahrzeugs bewerten (Tabelle 3.12).

Tabelle 3.12: Fahrmanövergruppen zur objektiven Bewertung des Fahrverhaltens [43]

Szenario	Umgebung	primäre Fahrzeugführung	Einordnung
Kreisfahrt	allgemein	Querführung	konstant
Wechsellenken	allgemein	Querführung	periodisch
Geradeausfahrt	allgemein	Längsführung	null
Lenkwinkelsprung	allgemein	Querführung	transient

NAGEL et al. [44] beschreiben Szenarien, die ein automatisiertes Fahrzeug durchfahren muss. Diese beinhalten sowohl Manöver, die innerorts auftreten, als auch das Fahren auf der Autobahn und auf Landstraßen (Tabelle 3.13).

Tabelle 3.13: Situationen für einen automatisierten Fahrzeugführer [44]

Szenario	Umgebung	primäre Fahrzeugführung	Einordnung
Auf- und Abfahren von der Autobahn	Autobahn	Längsführung	konstant
Passieren von Auf- & Abfahrten	Autobahn	Längsführung	null
Ausweichen eines Hindernisses ohne Verlassen des Fahrstreifens	allgemein	Querführung	transient
Einer Straße folgen	allgemein	Längsführung	null
Fahrstreifenwechsel links/rechts	Autobahn	Querführung	konstant
Auf dem Seitenstreifen halten	Autobahn	Längsführung	konstant
Vom Seitenstreifen anfahren	Autobahn	Längsführung	konstant
Vor einem Hindernis halten	allgemein	Längsführung	konstant
Auf Abbiegestreifen fahren	Stadt	Längsführung	konstant

Die Szenarienauswahl beschränkt sich neben der Bewertung eines menschlichen Fahrers auch auf Szenarien, die speziell für automatisierte Fahrzeuge entwickelt werden. Jedoch lassen sich Bewertungsmethoden, wie beispielsweise die Führerscheinrichtlinie, auch auf automatisierte Fahrfunktionen anwenden. Hier wird besonders der Sicherheitsaspekt und das regelkonforme Fahren betrachtet. Durch die Einordnung der Szenarien nach dem jeweiligen Einsatzgebiet und der primären Fahrzeugführung entsteht eine einheitliche Darstellung und eine Vergleichbarkeit.

3.2 Beschreibung der Szenarien durch Kennwerte und Parameter

Nachdem alle funktionalen Szenarien aus der Führerscheinrichtlinie, dem Fahrsicherheitstraining und der Literatur bestimmt und nach Längs- und Querführung eingeteilt sind, erfolgt nun eine nähere Beschreibung der abstrahierten logischen Szenarien. Anhand vorgegebener Parameter lässt sich ein Szenario genau definieren. Mittels vorgegebener Kennwerte lässt sich eine Situation genau für die objektive Charakterisierung bewerten. Es lassen sich jedoch nicht alle Kennwerte auf jedes Szenario anwenden (Abbildung 3.3).



Abbildung 3.4: Beschreibung von Situationen durch Parameter und Kennwerte

3.2.1 Parameter

Die Parameter lassen sich nach dem 5-Ebenen-Modell nach BAGSCHIK [11] unterteilen, welche Szenarien genau beschreiben. Das Layout einer Straße lässt sich durch verschiedene Parameter beschreiben, welche eine Parameterkategorie bilden. In dem 5-Ebenen-Modell stellt das Straßenlevel die erste Ebene dar. Beispielsweise wird die Fahrbahn einer Straße unter anderen durch die Fahrstreifenanzahl und -breite beschrieben (Tabelle 3.14).

Tabelle 3.14: Parameter - Straßenlayout

Parameter	Einheit	Parameterbereiche
Straßenart [56]	-	Autobahn; Bundes-; Staats-; Kreis-; Landstraße; innerorts; verkehrsberuhigter Bereich
Fahrstreifenanzahl [57]	-	1; 2; 3; 4; 5; 6
Fahrstreifenbreite [58, S. 18]	m	3,00 m; 3, 25 m; 3,50 m; 3,75 m
Kurvenradius [58]	m	280 m; 350 m; >350 m
Längsneigung [58, S. 38]	%	± 0 – 8,0 %
Querneigung [58, S. 9]	%	± 2,5 – 6,0 %
Markierung [59]	cm	Breite
Fahrstreifenmarkierung [59]	-	Standard; temporär; durchgezogen; gestrichelt
Gehweg [46]	-	ja; nein
Parkplatz [46]	-	ja; nein
Haltstelle öffentliche Verkehrsmittel [46]	-	ja; nein
Kreisverkehr [51]	-	ja; nein
Kreuzung [46]	-	rechts vor links; mit Ampel; mit Verkehrsschild
Fußgängerüberweg [51]	-	mit Ampel; Zebrastreifen; ohne/mit Insel
Wendehammer [46]	-	ja; nein

Das zweite Level, die Verkehrsinfrastruktur, wird ebenfalls durch Parameter beschrieben. Die Straßenverkehrsordnung regelt und lenkt den Verkehr, was durch Verkehrszeichen und Beschränkungen in §45 durchgesetzt wird (Tabelle 3.15) [47].

Tabelle 3.15: Parameter - Verkehrsinfrastruktur

Parameter	Einheit	Parameterbereiche
Mindestgeschwindigkeit	-	abhängig von der Straßenart; StVO Zeichen 525-31 [60]
Verkehrszeichen [56]	-	StVO-Zeichen
Höchstgeschwindigkeit [56]	-	abhängig von der Straßenart bzw. von Verkehrszeichen
Überholverbot [56]	-	Fahrzeugbeschränkung; Richtungsbeschränkung
Beschränkte Fahrzeugabmessungen [56]	-	StVO Zeichen 264, 265, 266 [60]

Fährt ein Fahrzeug auf einer Straße sind meistens andere Verkehrsteilnehmer an einem Manöver beteiligt. Fahrzeuge und bewegliche Objekte lassen sich in dem 5-Ebenen-Modell als bewegliche Objekte des vierten Levels klassifizieren. Ebenso wird das Ego-Fahrzeug durch Parameter aus Tabelle 3.16 beschrieben.

Tabelle 3.16: Parameter: Bewegliche Objekte

Parameter	Einheit	Parameterbereiche
Typ [46]	-	Hindernis; Fußgänger, Fahrradfahrer, Motorrad; LKW; PKW, Tier; Fzg. mit Sonderrechten
Abmessungen	m	-
Masse	kg	-
Geschwindigkeit longitudinal [56]	km/h	-
Geschwindigkeit lateral [61]	m/s	-
Entfernung zu anderen Objekten[56]	m	-
Dauer des Manövers	s	-
Beschleunigung longitudinal [42]	m/s ²	-
Beschleunigung lateral [41]	m/s ²	-
Trajektorie	m	zeitgesteuert; entfernungssteuert, eventgesteuert
Kurswinkel	-	relative Geschwindigkeit; relative Entfernung

Mögliche Objekte und Hindernisse müssen sich jedoch nicht unbedingt bewegen, sondern können auch eine feste Position haben. Grundsätzlich können diese Objekte vorher bereits bekannt sein, wie beispielsweise Bremsschwellen, oder aber unbekannt, wie beispielsweise Gegenstände, die von anderen Verkehrsteilnehmern verloren wurden (Tabelle 3.17).

Tabelle 3.17: Parameter - feste Objekte

Parameter	Einheit	Parameterbereiche
Typ	-	bekannt; unbekannt
Position	m	-
Abmessungen [46]	m	-

3.2.2 Kennwerte

Ein Szenario lässt sich durch objektive Kennwerte beurteilen. Dazu werden jeweils passende Kennwerte für ein bestimmtes Szenario verwendet. Die Kennwerte lassen sich in sechs Gruppen einteilen, die auf den Messgrößen Beschleunigung, Abstand, Zeit, Frequenz, Winkel und Geschwindigkeit basieren. Als Grundlage für die erste Gruppe an Kennwerten dient die Längs- und Querschleunigung. Kennwerte die auf einem gleitenden Mittelwert basieren, filtern kurze Ausschläge die nur sehr kurz auftreten, heraus, woraus sich objektiv bewertbare Kennwerte ergeben (Tabelle 3.18).

Tabelle 3.18: Kennwerte - Beschleunigung

Kennwerte	Einheit	Charakterisierung
Max. longitudinale Verzögerung [62]	m/s^2	Längsführung
Max. longitudinale Beschleunigung [62]	m/s^2	Längsführung
Max. laterale Beschleunigung [22]	m/s^2	Querführung
Max. lateraler Ruck [22]	m/s^3	Querführung
Max. longitudinaler Ruck [22]	m/s^3	Längsführung
Max. gleitender Mittelwert Beschleunigung über 2 s [42]	m/s^2	Längsführung
Max. gleitender Mittelwert Verzögerung über 2 s [42]	m/s^2	Längsführung
Max. gleitender Mittelwert longitudinaler Ruck über 1 s [62]	m/s^3	Längsführung
Max. gleitender Mittelwert lateraler Ruck über 0,5 s [41]	m/s^3	Längsführung
Gleichmäßigkeit des Fahrstreifenwechsels [22]		Querführung

Die zweite Gruppe an Kennwerten basiert auf dem Abstand zu anderen Verkehrsteilnehmern und Objekten. Auch ein Abstand zu Fahrbahnmarkierungen ist für das sichere und regelkonforme Führen des Fahrzeugs nötig (Tabelle 3.19).

Tabelle 3.19: Kennwerte - Abstand

Kennwerte	Einheit	Charakterisierung
Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug [56]	m	Längsführung
Abstand zur rechten Begrenzungslinie [46]	m	Querführung
Abstand zur linken Begrenzungslinie [46]	m	Querführung
Abstand von der Fahrstreifenmittellinie	m	Querführung
Spurversatz in neuem Fahrstreifen nach Fahrstreifenwechsel [22]	m	Querführung
Nutzungsgrad der vorhandenen Fahrstreifenbreite [22]	%	Querführung

In der Straßenverkehrsordnung ist der erlaubte Längsabstand zwischen zwei Fahrzeugen nicht nur über die Distanz festgelegt, sondern auch über die Zeitlücke [56]. Tritt ein plötzliches Hindernis vor dem Fahrzeug auf, wird eine niedrige Reaktionszeit des Fahrers gefordert. Diese wird auch bei der Gefahrenbremsung in der Führerscheinrichtlinie überprüft [46]. Objektive Kennwerte wie Time-To-Collision (TTC) sind übliche Kenngrößen aus der Literatur (Tabelle 3.20).

Tabelle 3.20: Kennwerte - Zeit

Kennwerte	Einheit	Charakterisierung
Zeitlücke	s	Längsführung
Reaktionszeit	s	Längsführung
TTC	s	Längsführung

Fährt ein Fahrzeug auf gerader Strecke folgt es idealerweise der Fahrstreifenmitte. Ein Pendeln um die Mitte stellt einen Kennwert dar, der für eine Aussage über das Fahrverhalten verwendet werden kann. Folgt ein Fahrzeug einem vorausfahrenden Fahrzeug beispielsweise in einer Stausituation, so kann in Längsrichtung ebenso ein periodisches Verhalten auftreten (Tabelle 3.21).

Tabelle 3.21: Kennwerte - Frequenz

Kennwerte	Einheit	Charakterisierung
Pendeln: um Fahrstreifenmitte	Hz	Querführung
Pendeln: Anfahren & Abbremsen	Hz	Längsführung

Für Szenarien, bei denen das Testfahrzeug eine Kurve durchfährt oder einen Fahrstreifenwechsel ausführt, sind winkelbasierende Kennwerte relevant. Für einen Kurvenradius lässt sich bei einem Fahrzeug ein idealer Lenkwinkel errechnen. Durchfährt das Fahrzeug diese Kurve mit einem bestimmten Lenkwinkel, so kann die Abweichung von dem idealen Lenkeinschlag errechnet werden. Über den Gierwinkel kann auch bestimmt werden, ob ein Fahrzeug sich dreht bzw. aus der Fahrspur ausbricht (Tabelle 3.22).

Tabelle 3.22: Kennwerte - Winkel

Kennwerte	Einheit	Charakterisierung
Abweichung Lenkwinkel [63]	deg	Querführung
Gierwinkel	deg	Querführung
Gierrate	deg/s	Querführung

Das Zeichen 274 der Straßenverkehrsordnung gibt die zulässige Höchstgeschwindigkeit an [60]. In der Führerscheinprüfung wird getestet, ob ein Fahrer sich an das Tempolimit hält, indem die auf dem Tacho angezeigte Geschwindigkeit mit der zulässigen Geschwindigkeit verglichen wird. Bei einem automatisierten Fahrzeug wird ein Kennwert benötigt, der die gefahrene Geschwindigkeit dokumentiert und vergleichbar macht. Bei einem Fahrstreifenwechsel tritt neben einer lateralen Beschleunigung auch eine Geschwindigkeit auf, mit der eine Aussage über die Querführung getroffen werden kann (Tabelle 3.23).

Tabelle 3.23: Kennwerte - Geschwindigkeit

Kennwerte	Einheit	Charakterisierung
Max. longitudinale Geschwindigkeit bei zugehöriger Geschwindigkeitsbegrenzung [56]	m/s	Längsführung
Max. laterale Geschwindigkeit [21]	m/s	Querführung

Ein Szenario lässt sich abschließend durch verschiedene objektive Werte beurteilen. Anhand der oben aufgeführten Kennwerte lassen sich verschiedene Systeme von Fahrzeugen vergleichen. Die Kennwerte nehmen Bezug auf Regelwerke wie die Straßenverkehrsordnung oder die Führerscheinrichtlinie, welche Fahrer bewerten und einen besonderen Bezug auf ein sicheres Verhalten nehmen.

3.3 Einordnung in Komfort, Fahrstil, Sicherheit und Regelkonformität

Anhand der vorher festgelegten Parameter und Kennwerte lassen sich die Szenarien zu bestimmten Gruppen zuordnen. Die Führerscheinrichtlinie [51], ein Fahrsicherheitstraining und auch die Straßenverkehrsordnung [56] beurteilen, wie ein Fahrer bzw. Fahrzeug fährt. Daraus können die vier grundlegenden Szenariokategorien Komfort, Fahrstil, Sicherheit und Regelkonformität abgeleitet werden. Bestimmte Szenarien lassen sich allen vier Kategorien zuordnen, andere jedoch nur einzelnen. Beispielfhaft sind in Tabelle 3.24 einige Szenarien aufgeführt. Als

Grundlage für die Bewertung des regelkonformen Fahrverhaltens des Testfahrzeugs dient die Straßenverkehrsordnung [56]. Die Basis für Fahrstil und -komfort bilden aktuelle Forschungsliteratur und auch die Führerscheinrichtlinie. Die Sicherheit des Fahrmanövers kann einerseits auch über die Straßenverkehrsordnung bewertet werden, andererseits aber auch über physikalische Grundlagen (Tabelle 3.24).

Tabelle 3.24: Beispielhafte Einordnung der funktionalen Szenarien in die Kategorien Sicherheit, Komfort, Fahrstil und Regelkonformität (Anhang E)

Funktionales Szenario	Fahrstil	Komfort	Sicherheit	Regelkonformität
Durchfahren einer Kurve	x	x	x	x
Passieren von Fußgängerüberwegen	x		x	x
Bremsen mit max. Verzögerung			x	x
Befahren von Kreuzungen mit Lichtzeichen	x	x		x

Das Ergebnis der funktionalen Szenarien zu den jeweiligen Kategorien wird in Tabelle 3.25 dargestellt. Die größte Anzahl der Szenarien kann der Sicherheit zugeordnet werden. Des Weiteren stellt die Regelkonformität einen großen Anteil dar. Ein sicheres und regelkonformes Verhalten eines automatisierten Fahrzeugs ist bezogen auf die Straßenverkehrsordnung und die Führerscheinrichtlinie von entscheidender Bedeutung.

Tabelle 3.25: Einordnung der Szenarien zu den Kategorien. Sicherheit enthält die größte Anzahl an Szenarien

Kategorie	Sicherheit	Komfort	Fahrstil	Regelkonformität
Anzahl	67	39	43	46

3.4 Beschreibung der logischen Szenarien

In Kapitel 2.2.3 werden funktionale, logische und konkrete Szenarien definiert. Zur Anwendung kommt bei der objektiven Fahrverhaltenscharakterisierung eine logische Szenariobeschreibung. Ein Szenario wird mit allen relevanten Parametern beschrieben und erklärt.

Im folgenden Abschnitt erfolgt die Erklärung anhand des Beispiels „Einfädeln in den fließenden Verkehr bei einer Autobahnauffahrt“, wie es in der Führerscheinrichtlinie [46] und den relevanten Situationen für automatisierte Fahrzeuge nach NAGEL [44] gefordert ist.

Im ersten Abschnitt der logischen Szenariobeschreibung wird kurz die Absicht, worüber das Szenario handelt, erklärt (Tabelle 3.26).

Tabelle 3.26: Szenariobeschreibung des logischen Szenarios „Einfädeln in den fließenden Verkehr bei einer Autobahnauffahrt“

Szenariobeschreibung	Ein Fahrzeug fährt auf die Autobahn auf und ordnet sich in den fließenden Verkehr ein
----------------------	---

3 Modell zur objektiven Charakterisierung des Fahrverhaltens

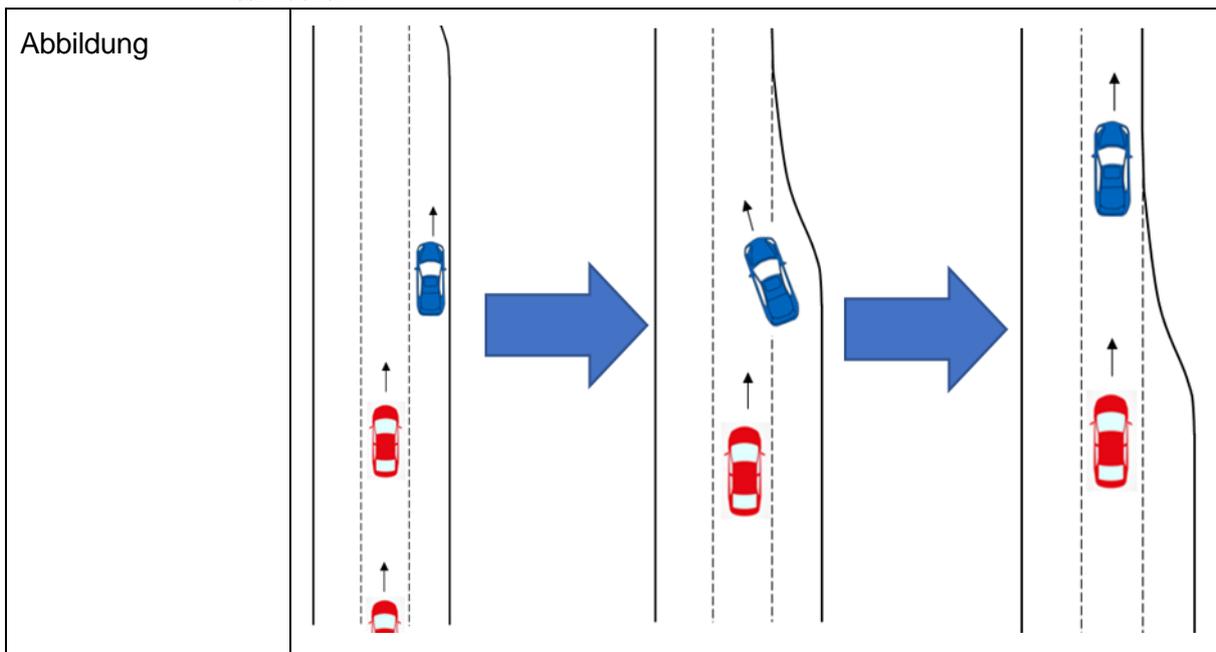
Im nächsten Abschnitt wird das Testobjekt festgelegt. Ein Testfahrzeug, das dem Automationslevel 3 entspricht, soll überprüft werden. Exemplarisch kann dieses Level mit den Fahrerassistenzsystemen abstandsgeregelter Tempomat, Spurhalteassistent und Fahrstreifenwechselassistent nachgebildet werden. Das Fahrmanöver muss daher entsprechend zu dem zugehörigen Testobjekt passend sein, damit dessen Fahreigenschaften objektiv bewertet werden können (Tabelle 3.27).

Tabelle 3.27: Testobjekt des logischen Szenarios „Einfädeln in den fließenden Verkehr bei einer Autobahnauffahrt“

Testobjekt	Level 3 exemplarisch mit ACC, LCA, LKA
------------	--

Die Abbildung soll das Fahrmanöver verdeutlichen. Das blaue Fahrzeug gibt das Ego-Fahrzeug wieder. Rot sind andere Verkehrsteilnehmer, die an dem Manöver beteiligt sind, dargestellt. Der blaue Pkw fährt auf der Auffahrt der Autobahn und beschleunigt. Anschließend schert es vor dem roten Pkw auf den rechten Fahrstreifen der Autobahn ein und fährt mit der vorgegebenen Geschwindigkeit weiter (Tabelle 3.28).

Tabelle 3.28: Abbildung des logischen Szenarios „Einfädeln in den fließenden Verkehr bei einer Autobahnauffahrt“



Im darauffolgenden Schritt wird erklärt, was das angestrebte Ziel bzw. die Beobachtung des Szenarios ist. In diesem Beispiel ist die Betrachtung, wie das Fahrzeug in der Auffahrt beschleunigt und bei welchem Abstand es noch vor dem anderen Verkehrsteilnehmer (rotes Fahrzeug) einschert. Abhängig kann dies auch von der Geschwindigkeit des anderen Verkehrsteilnehmers sein (Tabelle 3.29).

Tabelle 3.29: Beobachtung/Ziel des logischen Szenarios „Einfädeln in den fließenden Verkehr bei einer Autobahnauffahrt“

Beobachtung / Ziel	Dabei soll betrachtet werden wie das Fahrzeug in der Auffahrt beschleunigt und anschließend sich in den Verkehr einordnet.
--------------------	--

Nun kommen alle relevanten Parameter aus Kapitel 3.2 zur Anwendung. Die Parameter sind konkret für eine Variation beschrieben. Die Abmessungen und der Aufbau der Fahrbahn

entspricht den typischen Bewertungsgrößen, wie sie in der Richtlinie für die Anlage von Autobahnen niedergeschrieben ist [57, S. 77]. Die Fahrbahn der zweispurigen Autobahn hat eine Fahrstreifenbreite von 3,75 m. Der Beschleunigungsstreifen ist 250 m lang und 3,50 m breit. Das Ego-Fahrzeug sowie andere Verkehrsteilnehmer sind definiert. Für die Fahrverhaltenscharakterisierung nicht zwingend relevante Parameter sind in dieser Beschreibung nicht angegeben, sondern können in der Simulation durch für das Ergebnis des Szenarios unrelevante Werte beschrieben werden. (Tabelle 3.30)

Tabelle 3.30: Parameter des logischen Szenarios „Einfädeln in den fließenden Verkehr bei einer Autobahnauffahrt“

Parameter	<p>Fahrbahn:</p> <p>Straßentyp: Autobahn</p> <p>Fahrstreifenanzahl: 2</p> <p>Fahrstreifenbreite: 3,75 m</p> <p>Breite Beschleunigungsstreifen: 3,50 m</p> <p>Länge Beschleunigungsstreifen: 250 m</p> <p>Fahrzeug (VUT):</p> <p>Geschwindigkeit longitudinal zu Beginn der Auffahrt: $v = 60 \text{ km/h}$</p> <p>Fahrzeug 1 (TSV):</p> <p>Geschwindigkeit longitudinal: $v = 120 \text{ km/h}$</p> <p>Entfernung zum VUT: 60 m</p> <p>Fahrzeug 2 (TSV):</p> <p>Geschwindigkeit longitudinal: $v = 120 \text{ km/h}$</p> <p>Entfernung zum VUT: 120 m</p>
------------------	--

Abbildung 3.5: Szenariobeschreibung - Parameter

Im darauffolgenden Abschnitt sind die Variationen möglicher Parameter erklärt. In der Simulation und auf dem Prüfgelände können sinnvolle Kombinationen geprüft werden. Daraus kann hier beispielsweise eine Aussage getroffen werden, wie sich das Testfahrzeug verhält und wie nah es auf den anderen Verkehrsteilnehmer auffährt (Tabelle 3.31).

Tabelle 3.31: Parameter Variationen des logischen Szenarios „Einfädeln in den fließenden Verkehr bei einer Autobahnauffahrt“

Parameter Variationen	<p>Geschwindigkeit longitudinal TSV: $v = 80 \text{ bis } 130 \text{ km/h}$ in 10 km/h Schritten</p> <p>Entfernung zum VUT: 50 bis 200 m in 10 m Schritten</p>
------------------------------	---

Im letzten Teil der Szenariobeschreibung ist der Output aus den Versuchen dokumentiert. In einem globalen Koordinatensystem lassen sich alle Positionen der Fahrzeuge bestimmen. Daraus können anschließend Kennwerte wie beispielsweise der Abstand zwischen den Fahrzeugen ermittelt werden. Ebenso werden die Position der Fahrbahnbegrenzungslinien sowie Gier-, Nick- und Rollwinkel zur Berechnung relevanter Kennwerte benötigt. Die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen aller Fahrzeuge werden in einem fahrzeugfesten Koordinatensystem dokumentiert. In der Zeile Kennwerte sind die wichtigsten objektiven Kennwerte des Szenarios dargestellt. (Tabelle 3.32)

Tabelle 3.32: Output und daraus berechenbare Kennwerte des logischen Szenarios „Einfädeln in den fließenden Verkehr bei einer Autobahnauffahrt“

Output	Position der Fahrzeuge (globales Koordinatensystem) Geschwindigkeit und Beschleunigung der Fahrzeuge in Längs- und Querrichtung (fahrzeugfestes Koordinatensystem) Position der Fahrbahnbegrenzungslinien Gier-, Nick- und Rollwinkel
Kennwerte	min. longitudinaler Abstand zwischen Ego-Fahrzeug und Verkehrsteilnehmer beim Einscheren max. longitudinale Beschleunigung max. laterale Beschleunigung longitudinale Geschwindigkeit beim Einscheren

3.5 Durchführung konkreter Szenarien mittels Simulation

Die Beschreibung der logischen Szenarien, die an die Simulationsabteilung der TÜV SÜD Czech s.r.o., übergeben werden, erfolgt nach dem erklärten Aufbau in Kapitel 3.4. Diese logischen Szenariobeschreibung wird von der Simulationsabteilung in das entsprechende Format überführt, um es in einem Simulationsprogramm verarbeiten zu können. Dazu werden entsprechende Datenformate für die Spezifikation der Parameter wie OpenDRIVE [64] und OpenSCENARIO [65] herangezogen. Entsprechende Bedingungen ergänzen diese Datenformate in der Simulationsumgebung.

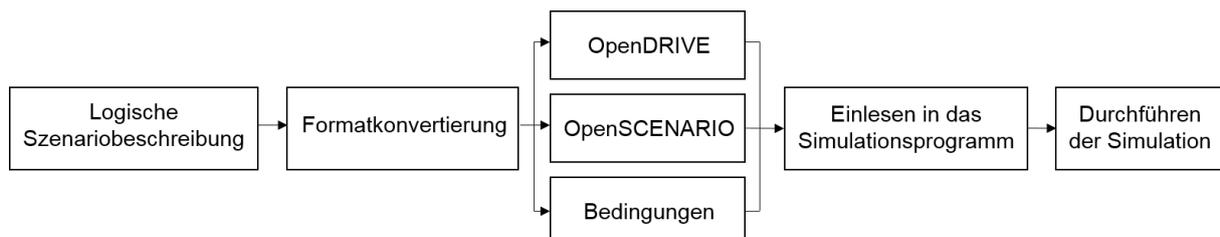


Abbildung 3.6: Prozessübersicht der Szenarioüberführung [66]

Die Spezifikationen der Parameter werden aus den beiden Simulationsformaten OpenDRIVE und OpenSCENARIO abgeleitet. OpenDRIVE beschreibt das Straßennetz, das in dem 5-

Ebenen-Modell durch die Straßenebene (E1), der Straßenausstattung (E2) und der temporären Beeinflussung der ersten beiden Ebenen (E3), repräsentiert wird. In dem Format OpenSCENARIO werden alle beweglichen Objekte (E4), wie beispielsweise Verkehrsteilnehmer und die Umweltbedingungen (E5) beschrieben. Die Bewegungen aller Fahrzeuge werden in OpenSCENARIO mithilfe von Manövern dargestellt, die in der funktionalen Szenariobeschreibung unter dem Punkt „Abbildung“ verdeutlicht sind [66, S. 5]. In Abbildung 3.7 ist die Zuordnung der Bestandteile des 5-Ebenen-Modells zu OpenDRIVE und OpenSCENARIO dargestellt.

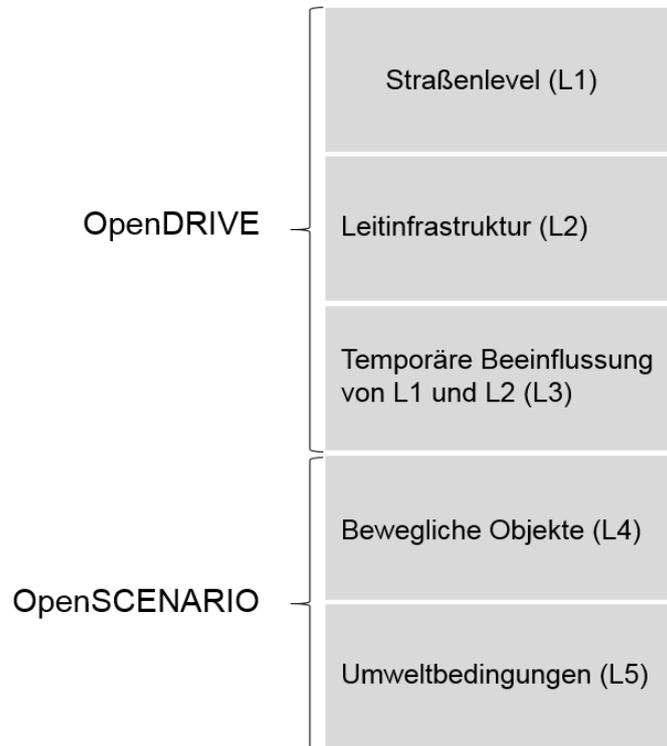


Abbildung 3.7: Aufteilung von OpenDRIVE und OpenSCENARIO auf das 5-Ebenen-Modell nach Bagchik. [67]

Im Anschluss an die Erstellung der Fahrbahn erfolgt die Übergabe in das Simulationsprogramm IPG CarMaker [68]. Hier findet die Simulation der vorher festgelegten Szenarien statt. Zugrunde gelegt sind hier Modelle für Fahrzeug, Straße, Fahrer und Verkehr. Die in der jeweiligen Szenariobeschreibung unter dem Punkt „Testobjekt“ beschriebenen Fahrerassistenzsysteme werden implementiert, wodurch eine Fahrfunktion abgebildet werden kann. Das Programm erfasst und dokumentiert die in der Szenariobeschreibung unter dem Punkt „Output“ angegebenen Werte. Zur Veranschaulichung der Simulation kann ein Video erstellt werden (Abbildung 3.8).

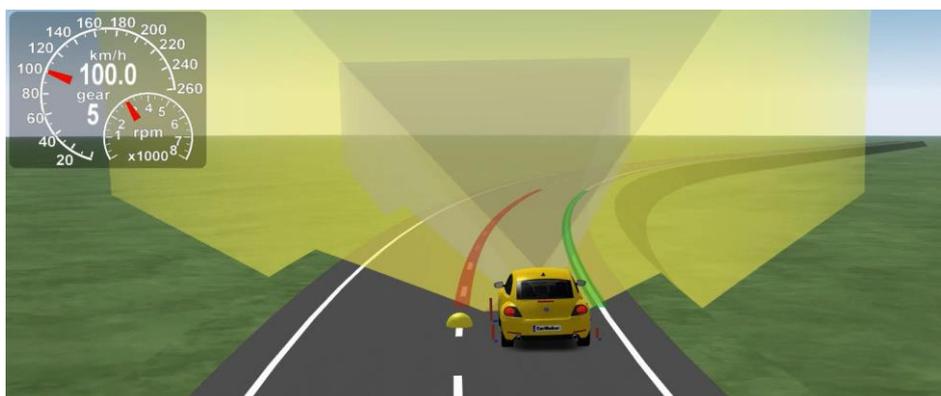


Abbildung 3.8: Visualisierung des Szenarios durch ein Video in IPG CarMaker

Das Fahrzeug in der Simulationsumgebung ist ein VW Beetle. Relevante Fahrzeugdaten sind in Tabelle 3.25 dargestellt.

Tabelle 3.33: VW Beetle Fahrzeugdaten

Fahrzeugparameter	Länge	Breite	Höhe	Radstand	Masse
Werte	4288 mm	1825 mm	1502 mm	2540 mm	1364 kg

3.6 Vorgehen zur Versuchsauswertung

Im Anschluss an die Simulation folgt die Auswertung der Ergebnisse. Die Rückgabe der Daten geschieht in einer Microsoft Excel Datei. Die Auswertung der verschiedenen Parametervariationen wird mit einem VBA-Programmcode automatisiert. Die Erklärung der Ergebnisse erfolgt hier an dem Beispielszenario des Durchfahrens einer S-Kurve. Die Auswertung anderer Szenarien erfolgt nach der gleichen Vorgehensweise. Die Ausrichtung des fahrzeugfesten Koordinatensystems ist wie in Abbildung 3.9 dargestellt.

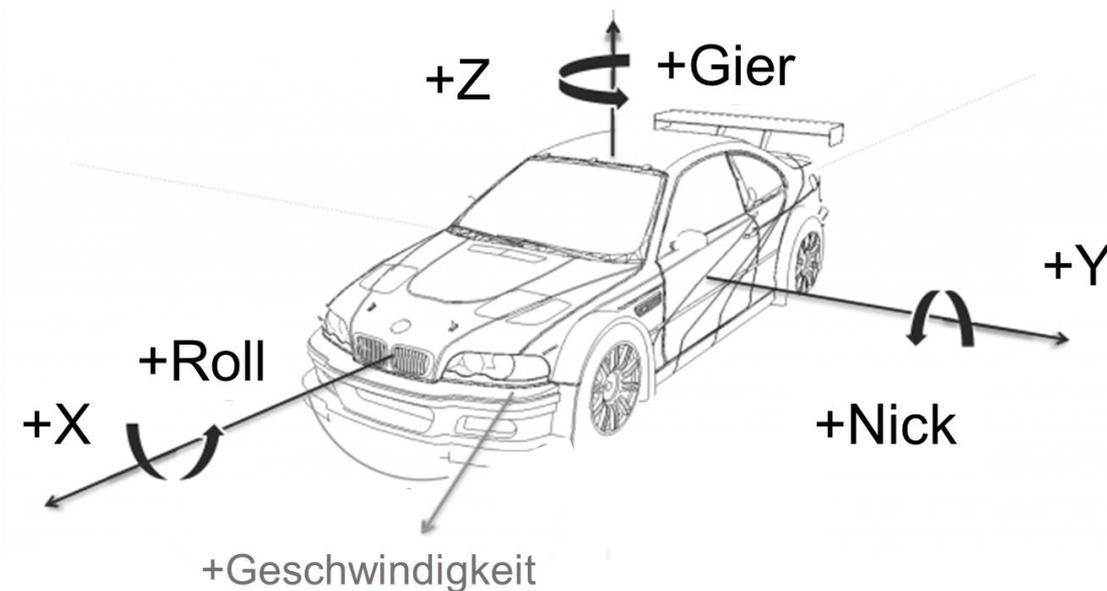


Abbildung 3.9: Fahrzeugkoordinatensystem [69]

Das Simulationsprogramm erstellt die Ergebniswerte in Zeitschritten von 10 ms. Aus dem Positionsverlauf von x- und y-Position lässt sich die gefahrene Trajektorie des Fahrzeugs erstellen. Beispielhaft ist in Abbildung 3.10 die gefahrene Trajektorie eines Fahrzeugs, das eine S-Kurve durchfährt, dargestellt.

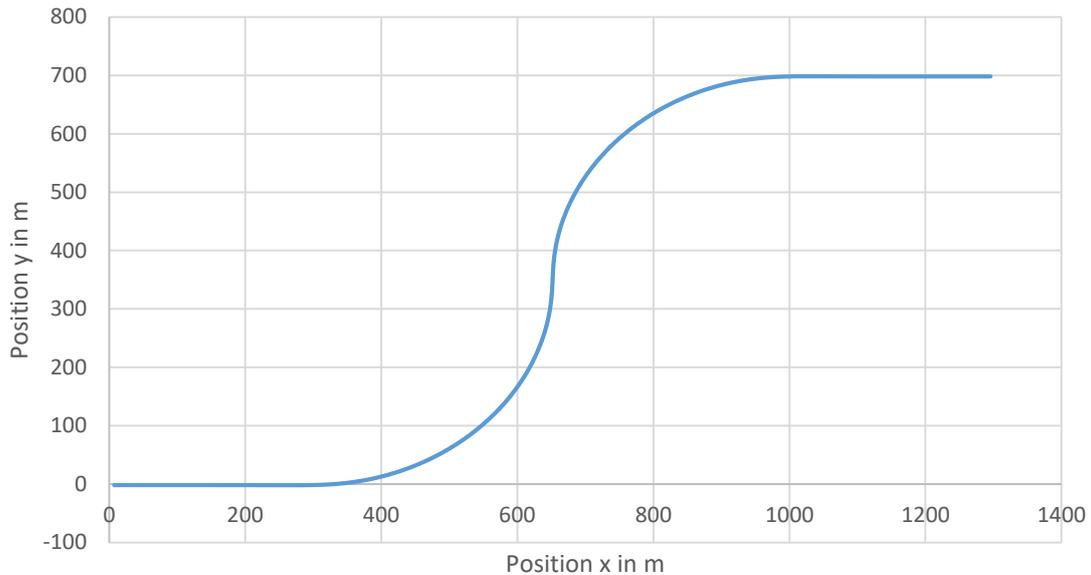


Abbildung 3.10: Trajektorie des Ego-Fahrzeugs

In den Ergebniswerten der Simulation kann nicht die Position der Fahrstreifenbegrenzungslinien angegeben werden. Stattdessen wird die Abweichung des Fahrzeugs von der Fahrbahnmittellinie festgehalten. Die Positionen der Fahrstreifenbegrenzungslinien lassen sich folglich daraus berechnen. Ebenso kann, wie in Abbildung 3.11 anhand eines Beispiels dargestellt wird, die Abweichung von der Fahrstreifenmitte bestimmt werden. Mit der Abweichung von der Fahrstreifenmitte kann unter Einbeziehung der Fahrzeugbreite der Abstand von den Begrenzungslinien berechnet werden.

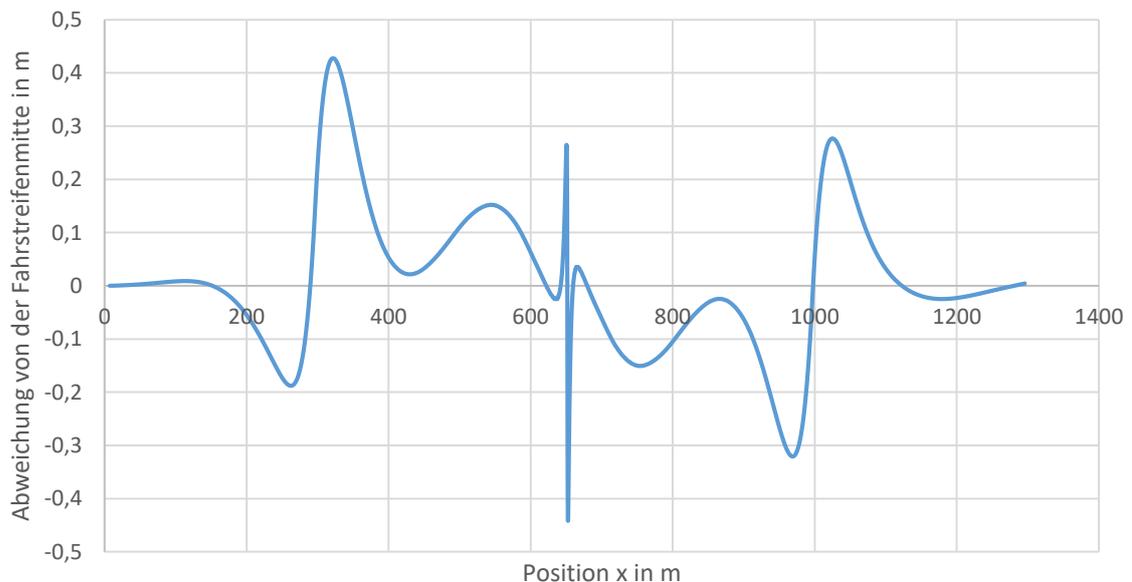


Abbildung 3.11: Abweichung von der Fahrstreifenmitte beim Durchfahren einer S-Kurve

Anhand der gefahrenen Linie und dem Abstandsverlauf zu den Begrenzungslinien lässt sich eine Aussage über das Kurvenfahrverhalten des Fahrzeugs treffen.

Die laterale Beschleunigung des Fahrzeugs wird aus der Beschleunigung in positiver und negativer y-Richtung des Fahrzeugs und der dazugehörigen x-Position in dem Streckenverlauf dargestellt. Aus dem Beschleunigungsverlauf kann man die maximale laterale Beschleunigung bestimmen. Bei diesem Beispielszenario erfährt das Fahrzeug bezogen auf das fahrzeugfeste Koordinatensystem keine longitudinale Beschleunigung, weshalb auf eine Darstellung der Längsbeschleunigung verzichtet wird (Abbildung 3.12).

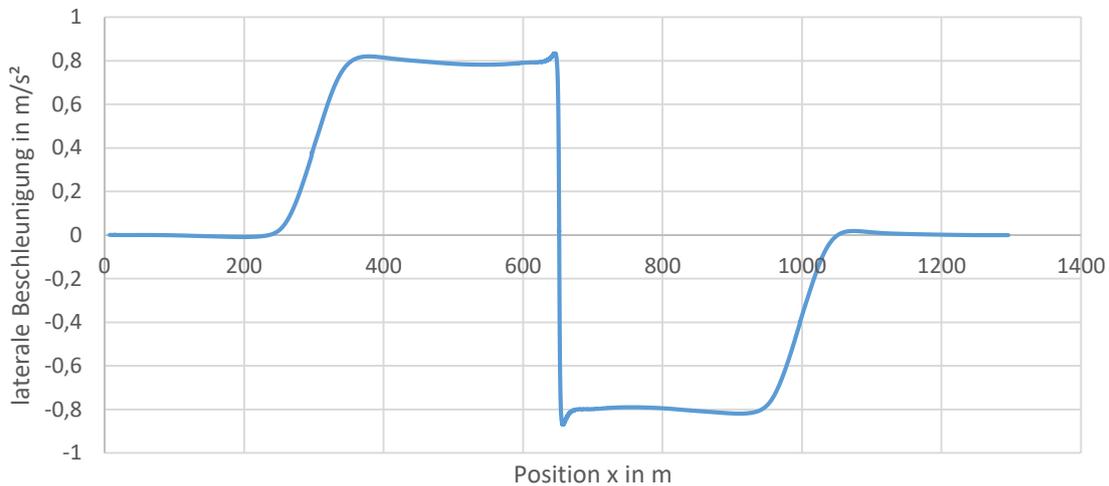


Abbildung 3.12: laterale Beschleunigung des Ego-Fahrzeugs beim Durchfahren der S-Kurve

Leitet man die laterale Beschleunigung nach der Zeit ab, lässt sich der laterale Ruck ermitteln. In der UNECE R79 wird der laterale Ruck eines Systems über den gleitenden Mittelwert über einen Zeitraum von 0,5 s bestimmt. Ein Ausschlag des Rucks ist bei Kurveneingang und -ausgang sowie bei dem Übergang zwischen den beiden Kurvenradien zu verzeichnen (Abbildung 3.13) [41, S. 24].

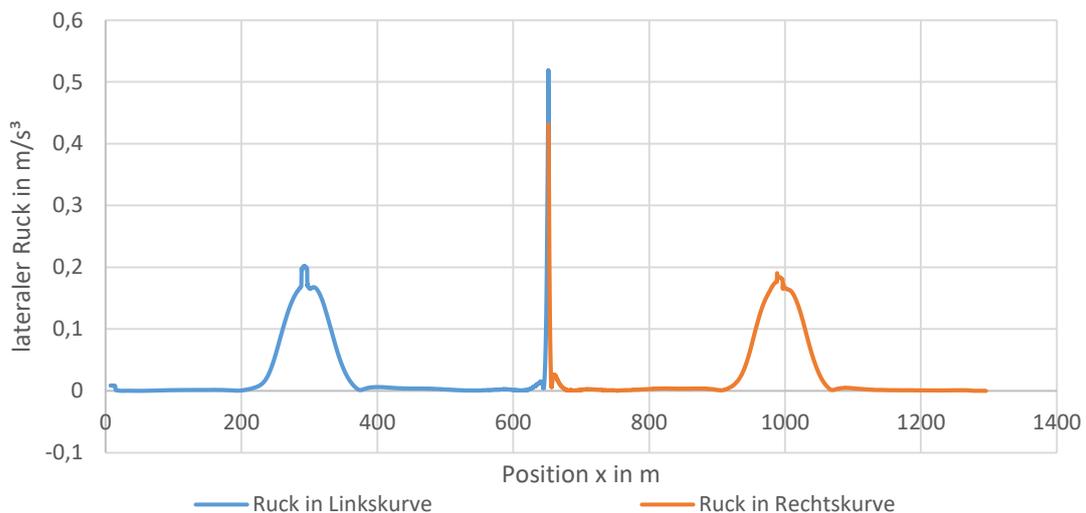


Abbildung 3.13: gleitender Mittelwert über 0,5 s des absoluten lateralen Rucks beim Durchfahren der Links- und der Rechtskurve

Die Verläufe der Werte bilden das Ergebnis der Simulation ab. Daraus lassen sich entsprechende Kennwerte bestimmen und berechnen. Bei der Ergebnisauswertung eines anderen Szenarios sind andere Kennwerte von Bedeutung.

Dem funktionalen Szenario des Durchfahrens einer S-Kurve, das hier als Beispiel dient, können verschiedene Kennwerte zugeordnet werden. Die Kennwerte werden den Kategorien Sicherheit, Regelkonformität, Komfort und Fahrstil aus Kapitel 3.3 zugeordnet. Dadurch können die Fähigkeiten des getesteten Systems genau aufgeschlüsselt werden. Für das logische Szenario, dessen Graphen in diesem Kapitel dargestellt sind, werden die Kennwerte in Tabelle 3.34 beispielhaft aufgezeigt.

Tabelle 3.34: Zuordnung von objektiven Kennwerten zu den Fähigkeiten des Systems bei dem funktionalen Szenario "Durchfahren einer S-Kurve"

Fähigkeiten	Sicherheit	Regelkonformität	Komfort	Fahrstil
Kennwert	Abstand zur Fahrbahnmittellinie	Abstand zur Fahrbahnmittellinie	max. laterale Beschleunigung	Abstand zur Fahrbahnmittellinie
Kennwert	Abstand zur Fahrbahnbegrenzung	Abstand zur Fahrbahnbegrenzung	max. gleitender Mittelwert des lateralen Rucks	Abstand zur Fahrbahnbegrenzung
Kennwert	max. laterale Beschleunigung			max. laterale Beschleunigung

3.7 Bewerten der Fähigkeiten nach Sicherheit, Regelkonformität, Komfort und Fahrstil

Anhand der vorher ermittelten Kenngrößen können für jedes Szenario spezifische Kennwerte bestimmt werden, welche sich mit maximal zulässigen Werten und Referenzgrößen aus Literatur, Normen und Standards vergleichen lassen.

3.7.1 Sicherheit

Die Sicherheit eines automatisierten Fahrzeugs stellt den wichtigsten Punkt der Ergebnisauswertung dar.

Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug

Der Abstand zu vorausfahrenden Fahrzeugen ist ebenso in der StVO in §4 festgelegt. „Der Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug muss in der Regel so groß sein, dass auch dann hinter diesem gehalten werden kann, wenn es plötzlich gebremst wird. Wer vorausfährt, darf nicht ohne zwingenden Grund stark bremsen.“ [56, §4] Der Abstand muss in der Regel der halben Tachometerzahl entsprechen [70]. Wird der Abstand durch ein einscherendes Fahrzeug unterschritten, muss der Sicherheitsabstand innerhalb von 3 s, bzw. bei Geschwindigkeiten über 160 km/h innerhalb einer 1s, wiederhergestellt sein.

Abstand bei Vorbeifahrt

Beim Überholen eines anderen Verkehrsteilnehmers muss ein ausreichender seitlicher Sicherheitsabstand eingehalten werden, der sich nach der eigenen Fahrzeugart, Fahrgeschwindigkeit, den Straßenverhältnissen, dem Wetter und der Art des anderen Verkehrsteilnehmers richtet [56, §5, 71]. Der Seitenabstand zu einem anderem Kraftfahrzeug muss mindestens 1 m betragen [72]. Zu einem Radfahrer muss ein größerer Abstand in Höhe von 1,5 bis 2 m eingehalten werden [56, §5].

3.7.2 Regelkonformität

Die Kennwerte der Sicherheit werden auch zur Überprüfung der Regelkonformität herangezogen. So ist der Abstand zu einem anderen Fahrzeug wichtig für die Sicherheit im Straßenverkehr und wird deswegen auch in der Straßenverkehrsordnung reglementiert.

Fahrstreifennutzungsgrad

Die Bestimmung des Rechtsfahrgebots auf Straßen ist in §2 der Straßenverkehrsordnung festgehalten. „Es ist möglichst weit rechts zu fahren, nicht nur bei Gegenverkehr, beim Überholtwerden, an Kuppen, in Kurven oder bei Unübersichtlichkeit.“ [56, §2] Bewerten lässt sich diese Regelung durch die Berechnung des Fahrstreifennutzungsgrad nach HOLZINGER et al. [22, S. 18].

$$\text{Fahrstreifennutzung} = \frac{\text{Abstand der inneren Fzg.außenkante zur Fahrbahnbegrenzungslinie}}{\text{Fahrstreifenbreite}} \quad (3.1)$$

Abweichung von den Fahrstreifenbegrenzungslinien

Ein Überschreiten der Fahrbahnmittellinie ist jedoch in bestimmten Situationen, wie beispielsweise zu Überholzwecken erlaubt. Fährt ein Fahrzeug aber in einer Kurve oder wird überholt darf die Mittellinie nicht überfahren werden, unabhängig davon ob diese durchgezogen ist oder nicht. Der Fahrstreifennutzungsgrad muss in diesem Bereich niedrig sein als die Fahrstreifenbreite. Wechselt ein Fahrzeug den Fahrstreifen kann der Spurversatz in dem neuen Fahrstreifen ermittelt werden. Damit lässt sich die Vollständigkeit des Fahrstreifenwechsels, also ob die Fahrzeuglage in dem neuen Fahrstreifen akzeptabel ist, bestimmen [22, S. 19].

3.7.3 Komfort und Fahrstil

Der Fahrkomfort und der Fahrstil beeinflussen sich gegenseitig. Die Beurteilung einer komfortablen Fahrweise ist meist abhängig von der Erwartungshaltung des Fahrers. Bestimmte Kennwerte kommen daher sowohl bei der Komfortbewertung als auch bei der Fahrstilbeurteilung zum Einsatz. Die bestimmten Wertebereiche stellen eine erste Näherung der Kennwerte dar. Daher wird auf eine geschwindigkeitsabhängige Bestimmung der Bereiche verzichtet. Es ist jedoch zu erwarten, dass mit zunehmender Geschwindigkeit die Beschleunigungen in longitudinaler Richtung abfallen.

Longitudinale Verzögerung

In der Literatur erfolgt üblicherweise die Einteilung des Fahrstils in drei verschiedene Kategorien. Unterschieden wird zwischen einem defensiven, einem normalen und einem aggressiven Verhalten, welchem jeweils bestimmte Wertebereiche zugeordnet werden können. Die longitudinale

Verzögerung eines defensiven Fahrers ist üblicherweise in einem Bereich zwischen 1,4 und 2,6 m/s². Die Längsverzögerung bei einem normalen Fahrstil liegen zwischen 2,6 und 5,5 m/s², bei einem aggressiven Verhalten zwischen 5,5 und 7,6 m/s². [28–30, 37, 38, 73]

Für die longitudinale Verzögerung des Fahrzeugs kommen ebenfalls drei Kategorien zur Anwendung. Die erste Abstufung beschreibt ein hohes Komfortniveau mit einem Bereich von 0 bis 2,5 m/s². Die zweite Stufe bilden negative Beschleunigungen zwischen 2,5 und 5,5 m/s² auf einem mittleren Komfortlevel. Ein geringer Komfort kommt in dem Bereich von 5,5 bis 8,0 m/s² auf. [39, 73] Wie in Tabelle 3.35 zu erkennen ist, liegen die Werte für eine longitudinale Verzögerung beim Fahrstil und dem Komfortniveau in einem ähnlichen Bereich. Ein defensiver Fahrstil generiert meist auch ein hohes Komfortniveau.

Tabelle 3.35: Fahrstil: longitudinale Verzögerung

Fahrstil	Longitudinale Verzögerung in m/s ²	Komfortniveau	Longitudinale Verzögerung in m/s ²
defensiv	1,4 – 2,6	hoch	0 – 2,5
normal	2,6 – 5,5	mittel	2,5 – 5,5
aggressiv	5,5 – 7,6	niedrig	5,5 – 8,0

Um ein sicheres Fahrverhalten aufzuweisen und ein gutes Komfortniveau zu generieren werden Grenzwerte für die longitudinale Verzögerung festgelegt. Das heißt, dass das Fahrzeug bei Beschleunigungen über den Grenzwerten kein erlaubtes Verhalten aufweist. Diese beruhen auf der ISO 15622:2018 [42]. Bis zu einer Geschwindigkeit von 18 km/h darf die maximale Verzögerung des Fahrzeugs mit einem gleitenden Mittelwert über 2 s eine Höhe von 5,0 m/s² und bei einer Geschwindigkeit über 72 km/h einen Wert von 3,5 m/s² nicht überschreiten. In dem Bereich von 18 bis 72 km/h werden die Werte nach der Formel 3.2 berechnet.

$$a_{verz,long} = -0,1 * v_{long} + 5,5 \tag{3.2}$$

$a_{verz,long}$ = longitudinale Verzögerung des Fahrzeugs

v_{long} = longitudinale Geschwindigkeit des Fahrzeugs

Longitudinale Beschleunigung

Die longitudinale Beschleunigung eines defensiven Fahrers ist meist in einem Bereich zwischen 1,4 und 2,0 m/s². Die Längsbeschleunigung bei einem normalen Fahrstil liegen zwischen 2,0 und 3,8 m/s² und bei einem aggressiven Verhalten zwischen 3,8 und 5,0 m/s². Die Längsbeschleunigung eines Fahrzeugs und der damit verbundene Fahrstil wird jedoch auch von der Motorisierung des Fahrzeugs limitiert. (Tabelle 3.37) [28–30, 37, 38, 73]

Für die longitudinale Beschleunigung des Fahrzeugs kommen ebenfalls drei Komfortbereiche zur Anwendung. Die erste Abstufung beschreibt ein hohes Komfortniveau mit einem Bereich von 0 bis 2,0 m/s². Die zweite Stufe bilden Längsbeschleunigungen zwischen 2,0 und 5,0 m/s² auf einem mittleren Komfortlevel. Ein geringer Komfort kommt in dem Bereich von 5,0 bis 7,0 m/s² auf. (Tabelle 3.37) [39, 73]

Tabelle 3.36: Fahrstil: longitudinale Beschleunigung

Fahrstil	Longitudinale Beschleunigung in m/s ²	Komfortniveau	Longitudinale Beschleunigung in m/s
defensiv	1,4 – 2,0	hoch	0 – 2,0
normal	2,0 – 3,8	mittel	2,0 – 5,0
aggressiv	3,8 – 5,0	niedrig	5,0 – 7,0

Damit ein normales Komfort- und Sicherheitsniveau generiert wird, werden Grenzwerte auf Grundlage der ISO 15622:2018 [42] für die automatische longitudinale Beschleunigung festgelegt. Das heißt, dass die Werte einem normalen Fahrstil entsprechen und daher ein mittleres, normales Komfortniveau hervorrufen. Die longitudinale Beschleunigung des Fahrzeugs wird ebenso über einen Zeitraum von 2 s gemittelt. Bis zu einer Geschwindigkeit von 18 km/h ist eine Beschleunigung von 4,0 m/s² erlaubt. Ab Geschwindigkeiten von 20 km/h sind 2,0 m/s² zulässig. In dem Bereich von 18 bis 72 km/h werden die Werte nach der Formel 3.3 berechnet.

$$a_{long} = -\frac{2}{15} * v_{long} + \frac{14}{3} \quad (3.3)$$

a_{long} = longitudinale Beschleunigung des Fahrzeugs

v_{long} = longitudinale Geschwindigkeit des Fahrzeugs

Longitudinaler Ruck

Der longitudinale Ruck wirkt auf das Komfortempfinden ein. Um ein normales Komfortniveau zu haben, werden Grenzwerte festgelegt. Diese sind abhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit des Fahrzeugs. Relevant für die Auswertung sind Bei einer Verzögerung darf der longitudinale Ruck bei einer Geschwindigkeit unter 18 km/h im Durchschnitt über 1 s nicht höher als 5 m/s³ sein. Bei Geschwindigkeiten über 72 km/h ist der Grenzwert auf 2,5 m/s³ beschränkt In dem Bereich von 18 bis 72 km/h erfolgt die Bestimmung des erlaubten longitudinalen Rucks über die Formel 3.4. [42]

$$j_{verz,long} = -\frac{1}{6} * v_{long} + \frac{35}{6} \quad (3.4)$$

$j_{verz,long}$ = longitudinaler Ruck bei einer Verzögerung des Fahrzeugs

v_{long} = longitudinale Geschwindigkeit des Fahrzeugs

Laterale Beschleunigung

Der Kennwert der lateralen Beschleunigung beschreibt den Fahrstil und den Fahrkomfort eines Fahrers bzw. Systems maßgeblich. Die maximal erfahrbare Beschleunigung ist immer abhängig vom Kurvenradius. So können bei einem großen Radius bestimmte Bereiche unter normalen Bedingungen nicht erreicht werden. Bei einem Fahrstreifenwechsel kann ein Fahrstil jedoch nicht unbedingt durch die laterale Beschleunigung beschrieben werden. Ein aggressiver Fahrstil bedeutet nicht zwangsläufig, dass die Beschleunigungen in laterale Richtung hoch sind. Die Einteilung des Fahrstils bzw. Komforts erfolgt genauso wie bei der longitudinalen Beschleunigung. Die laterale Beschleunigung eines defensiven Fahrers bzw. Systems ist üblicherweise in

einem Bereich zwischen 1,5 und 2,9 m/s². Die Querführung bei einem normalen Fahrstil liegt zwischen 2,9 und 4,8 m/s², bei einem aggressiven Verhalten zwischen 4,8 und 5,4 m/s². [29, 30, 37, 38, 73]

Für die Komfortbewertung des Fahrzeugs bezogen auf die laterale Beschleunigung kommen ebenfalls drei Kategorien zur Anwendung. Die erste Abstufung beschreibt ein hohes Komfortniveau mit einem Bereich von 0 bis 1,8 m/s². Die zweite Stufe bilden Beschleunigungen zwischen 1,8 und 3,6 m/s² auf einem mittleren Komfortlevel. Ein geringer Komfort kommt in dem Bereich von 3,6 bis 5,0 m/s² auf. (Tabelle 3.39) [38, 39, 73]

Tabelle 3.37: Fahrstil - laterale Beschleunigung

Fahrstil	Laterale Beschleunigung in m/s ²	Komfortniveau	Laterale Beschleunigung in m/s ²
defensiv	1,5 – 2,9	hoch	0 – 1,8
normal	2,9 – 4,8	mittel	1,8 – 3,6
aggressiv	4,8 – 5,4	niedrig	3,6 – 5,0

Die laterale Beschleunigung eines Fahrzeugs darf einen Wert von 3,0 m/s² in allen Geschwindigkeitsbereichen nicht überschreiten. Dadurch wird sichergestellt, dass der Fahrstil und das Komfortniveau des Fahrzeugs auf einem normalen Level. [41, S. 21]

Gleichmäßigkeit des Fahrstreifenwechsels

Die Länge eines Fahrstreifenwechsels hängt von der von einem Fahrer tolerierten Querbesehleunigung ab. Ein automatisiertes Fahrzeug legt die Länge des Vorgangs jedoch selbst fest. Bestimmt man diese Länge, lässt sich die krümmungsminimale Beschleunigung nach Formel 3.5 berechnen [74, S. 44].

$$a_{quer,ideal} = v^2 \frac{\frac{w\pi^2}{2l^2} \cdot \cos\left(\frac{D-D_0}{l} \cdot \pi\right)}{\left(1 + \left[\frac{w\pi}{2l} \cdot \sin\left(\frac{D-D_0}{l} \cdot \pi\right)\right]^2\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (3.5)$$

$a_{quer,ideal}$ = krümmungsminimale Querbesehleunigung beim Fahrstreifenwechsel

v = longitudinale Geschwindigkeit des Fahrzeugs

w = Breite des Fahrstreifenwechsels

D = Endposition des Fahrstreifenwechsels

D_0 = Startposition des Fahrstreifenwechsels

l = Länge des Fahrstreifenwechsels

Die durchschnittliche absolute laterale Beschleunigung kann aus dem Beschleunigungsverlauf bestimmt werden. In Referenz dazu lässt sich die krümmungsminimale Beschleunigung setzen, wodurch die Gleichmäßigkeit des Fahrstreifenwechsels bewertet werden kann.

Lateraler Ruck

Der Grenzwert für den maximalen lateralen Ruck eines Fahrzeugs darf über einen zeitlichen Durchschnitt von 0,5 s nicht größer als 5 m/s^3 sein. Dadurch kann ein normales Komfortniveau erreicht werden. [41, S. 24]

3.8 Bestimmung von Schwachstellen und Anpassung der Szenarien anhand der Ergebnisse

Sind alle Kennwerte bestimmt und referenziert, lassen sich daraus Schwachstellen des Systems ermitteln. Betrachtet werden besonders jene Kennwerte, die ein auffälliges Ergebnis aufweisen. Als Beispiel kann hier ein unterschreiten von Sicherheitsabständen aufgeführt werden. Bei der Betrachtung der Schwachstellen wird ein besonderes Augenmerk auf die Sicherheit des Systems gelegt. Die Wahrnehmung des Fahrstils und des Komforts sind immer auch durch ein subjektives Empfinden der Insassen und weiteren Verkehrsteilnehmer geprägt. Daher erfolgt eine Bewertung dieser beiden Kategorien durch eine Näherung der Ergebnisse. Die Bewertung der Regelkonformität kann durch die Straßenverkehrsordnung erfolgen. Ein Fehlverhalten lässt sich hier genau bestimmen. Ebenso kann die Sicherheit des Systems durch objektiver Kennwerte beurteilt werden. Durch die Vergleichbarkeit mit Kennwerten verschiedener Parametervariationen und Systeme können Schwachstellen, besonders in Bezug auf die Sicherheit und Regelkonformität, genau ermittelt werden. Sind Schwachstellen erkannt, lassen sich daraus die Szenarien dahingehend anpassen, dass diese gezielt auf die Eigenheiten des Fahrzeugs abzielen können. Die Szenarienzahl kann eben dadurch verringert werden, dass nur die Schwachstellen und Auffälligkeiten des jeweiligen Fahrzeugs bzw. Systems betrachtet werden. Fährt ein Fahrzeug beispielsweise in einer Kurve zu weit innen und überfährt eine Fahrstreifenbegrenzungslinie, lässt sich diese Schwachstelle des Systems weiter untersuchen. Eine mögliche Anpassung des Systems ist ein Hindernis auf der Kurveninnenseite. (Abbildung 3.14)

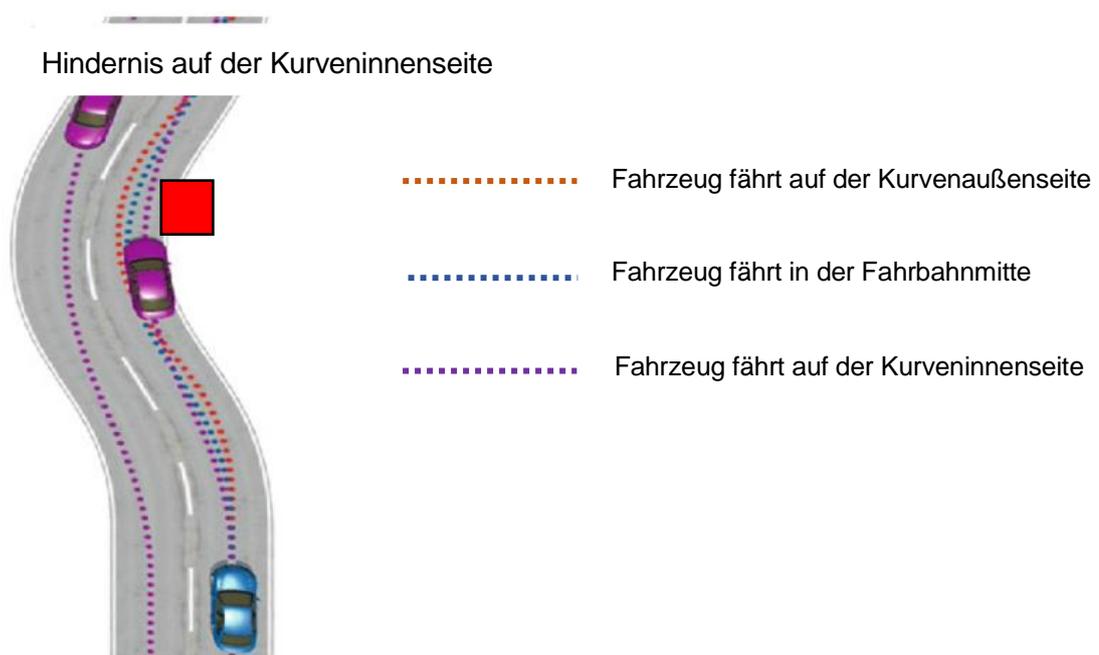


Abbildung 3.14: Durchfahren einer Kurve [21]

3.9 Zusammenfassung des Vorgehensmodells

Im ersten Schritt werden alle relevanten Szenarien aus wissenschaftlichen Publikationen erfasst. Weiterhin dienen Fahrmanöver aus Fahrsicherheitstrainings und die Führerscheinrichtlinie mit der theoretischen und praktischen Prüfung als Grundlage. Es erfolgt eine Einteilung in Stadtverkehr, Autobahn, Landstraße und allgemeine Szenarien, die in allen Örtlichkeiten auftreten können. Die Situationen werden nach Längs- und Querführung unterteilt und anschließend nach dem Verlauf der Beschleunigung in null, konstant, transient und periodisch gegliedert. (Abbildung 3.15, blauer Kasten)

Im nächsten Schritt erfolgt die Beschreibung der funktionalen Szenarien durch Parameter. Bestimmte Kennwerte bewerten diese Szenarien. (Abbildung 3.15, rot Kasten)

Es folgt die Einordnung der Situationen in die vier Bewertungskategorien Komfort, Fahrstil, Sicherheit und Überprüfung der Regelkonformität. Nicht jede Situation kann dabei zur Beurteilung jeder Kategorie verwendet werden. (Abbildung 3.15, grün Kasten)

Als nächstes werden die Szenarien in einer logischen Szenariobeschreibung erfasst. Darin wird das Szenario genau erklärt und das Ziel der Untersuchung beschrieben. Eine Skizze dient hierbei zur Verdeutlichung. Alle für das Ergebnis relevanten Parameter werden dargestellt und Variationen erläutert. Abschließend folgt noch eine Auflistung der Output-Parameter. (Abbildung 3.15, gelb Kasten)

Ist die Simulation des Szenarios durchgeführt, werden die Ergebnisse ausgewertet. Alle relevanten Daten, die für die weitere Beurteilung nötig sind werden erarbeitet und dokumentiert. Dazu gehörige Verläufe einer Kenngröße, aber auch Absolutwerte werden bestimmt. (Abbildung 3.15, oranger Kasten)

Daraufhin erfolgt die Bewertung der Fähigkeiten des Fahrzeugs. Hierzu werden Kennwerte aus der Literatur, Normen und Regelungen als Bewertungsgröße herangezogen. Bestimmte Kennwerte werden jeweils dem regelkonformen Fahrverhalten, der Sicherheit, dem Fahrstil und auch dem Fahrkomfort zugeordnet und bewertet. (Abbildung 3.15, grauer Kasten)

Anhand dieser Kennwerte in den einzelnen Fähigkeiten des Fahrzeugs lassen sich Schwachstellen des Systems bestimmen, die für die weitere Anpassung der Szenarien herangezogen werden können. (Abbildung 3.15, schwarzer Kasten)

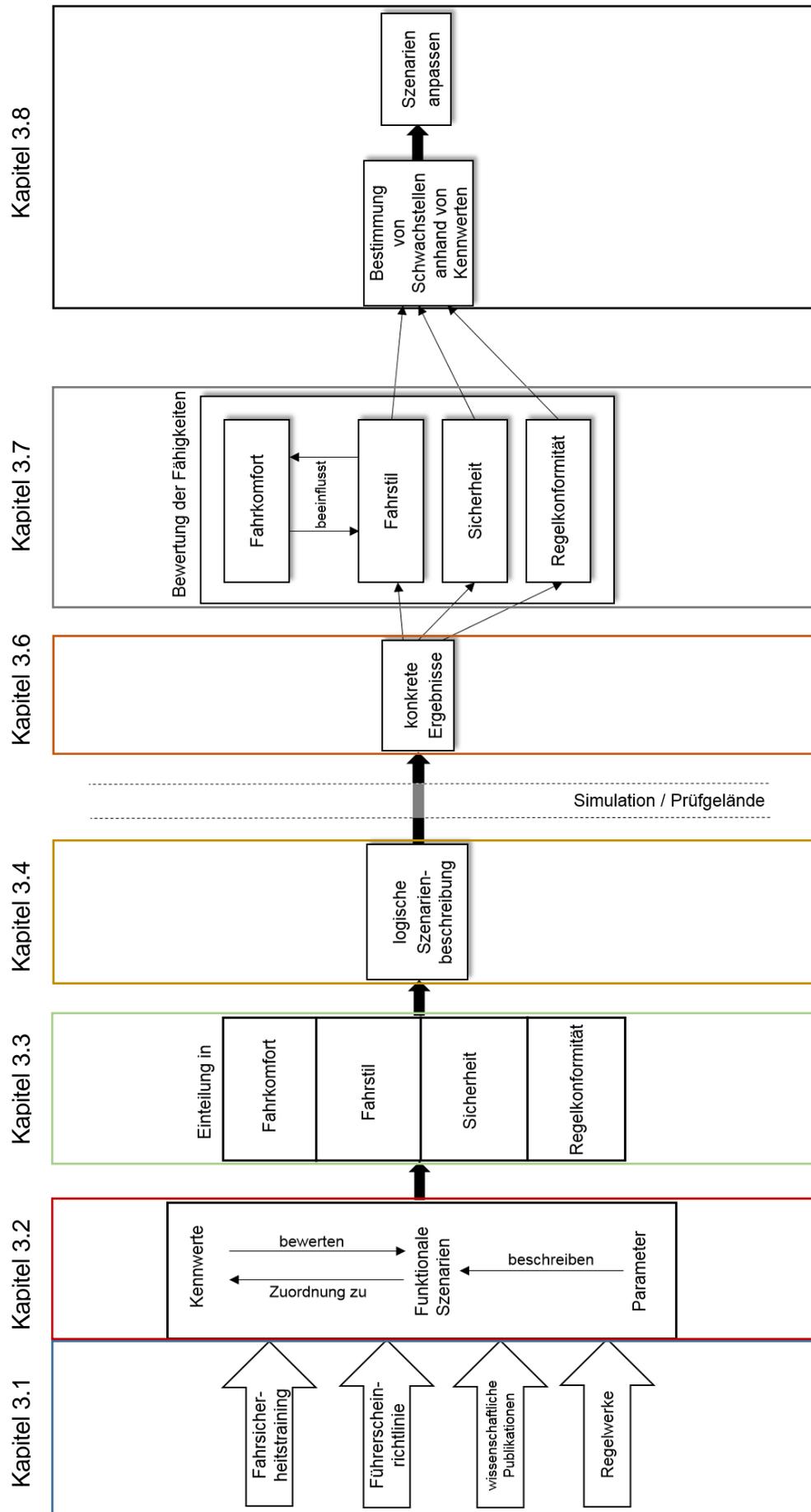


Abbildung 3.15: Vorgehensmodell

4 Ergebnisse

Nachdem die Vorgehensweise zur objektiven Charakterisierung des Fahrverhaltens erarbeitet wurde, erfolgt nun die Auswertung der Simulationsergebnisse. Beispielhaft wird hier die Auswertung des Szenarios Überholvorgang beschrieben. Auf wichtige Punkte der anderen Test-szenarien wird im zweiten Teil des Kapitels eingegangen.

4.1 Szenariobeschreibung Überholvorgang

Ein Fahrzeug fährt auf ein langsames Fahrzeug auf der Autobahn auf. Es soll dieses überholen und anschließend wieder auf den ursprünglichen Fahrstreifen zurückwechseln. Beobachtet werden soll dabei, wie das Fahrzeug, bezogen auf relevante Kennwerte, den Überholvorgang durchführt. Das Manöver beginnt bei einem Längsabstand zwischen den beiden Fahrzeugen von 200 m. Das vorausfahrende Fahrzeug fährt mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h, das Ego-Fahrzeug mit 130 km/h. Betrachtet wird das Verhalten bei verschiedenen Geschwindigkeiten und auch, ob ein auffälliges Verhalten eintritt, wenn das vorausfahrende Fahrzeug in einem Abstand von 100 m vor dem Ego-Fahrzeug das Bremsen beginnt (Tabelle 4.1).

Tabelle 4.1: Szenariobeschreibung Überholvorgang

Szenariobeschreibung	Ein Fahrzeug fährt auf ein langsames Fahrzeug auf und schert aus, um dieses zu überholen. Danach wechselt es wieder in den ursprünglichen Fahrstreifen zurück.
Testobjekt	Level 3 exemplarisch mit ACC, LKA, LCA
Abbildung	

Beobachtung/Ziel	Es soll beobachtet werden, welchen Abstand das Ego-Fahrzeug zum vorausfahrende Fahrzeug einhält und außerdem noch, wie das Ego-Fahrzeug den Fahrstreifen wechselt, welchen Abstand es zum vorausfahrende Fahrzeug einhält und in welchem Abstand es wieder vor dem Fahrzeug einschert.
Parameter	<p>Fahrbahn:</p> <p>Straßentyp: Autobahn</p> <p>Fahrstreifenanzahl: 2</p> <p>Fahrstreifenbreite: 3,75 m</p> <p>Ego-Fahrzeug (VUT):</p> <p>Geschwindigkeit longitudinal: $v = 130 \text{ km/h}$</p> <p>langsames Fahrzeug (TSV):</p> <p>$v = 80 \text{ km/h}$</p> <p>Entfernung zum VUT zu Beginn: 200 m</p>
Parameter Variationen	<p>Geschwindigkeit VUT: $v = 100 \text{ bis } 130 \text{ km/h}$ in 10 km/h-Schritten</p> <p>Geschwindigkeit TSV: $v = 80 \text{ bis } 120 \text{ km/h}$ in 10 km/h-Schritten</p> <p>→ nur Kombinationen bei denen $v_{VUT} > v_{TSV}$</p> <p>TSV beginnt mit -2 m/s^2 zu bremsen, wenn der Abstand zwischen TSV & VUT 100 m ist.</p>

4.2 Auswertung der Simulationsergebnisse

Im Anschluss an die Simulation erfolgt die Auswertung der Ergebnisse. Die Erklärung erfolgt in dem folgenden Abschnitt beispielsweise anhand der Parametervariation bei der das Ego-Fahrzeug eine Start-Geschwindigkeit von 130 km/h und das vorausfahrende Fahrzeug eine Geschwindigkeit von 80 km/h hat. Anschließend erfolgt eine Beurteilung der komplett simulierten Parametervariation. Als Grundlage für die Beurteilung der Fähigkeiten des Ego-Fahrzeugs dienen die in Kapitel 3 definierten objektiven Kennwerte.

4.2.1 Regelkonformität

Die Trajektorie des zu beobachtenden Fahrzeugs ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Das vorausfahrende Fahrzeug fährt konstant geradeaus bei der Position $-1,875 \text{ m}$ von der Fahrbahnmittellinie aus. Das Ego-Fahrzeug fährt zu Beginn auf dem rechten Fahrstreifen in einem Abstand von $-1,875 \text{ m}$ zur Fahrbahnmittellinie. Als null ist die Fahrbahnmittellinie festgelegt. Wechselt es auf den linken Fahrstreifen regelt es sich bei der Position $1,875 \text{ m}$ ein.

Wechselt es auf den ursprünglichen rechten Fahrstreifen zurück, nimmt es eine Position in einem Abstand von $-1,23$ m zur Fahrbahnmittellinie ein (Abbildung 4.1).

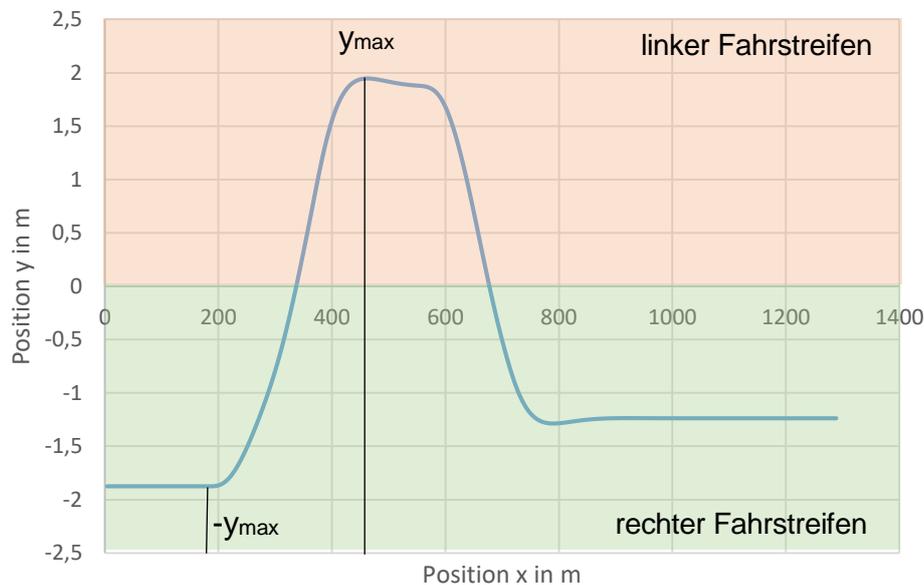


Abbildung 4.1: Trajektorie des Ego-Fahrzeugs mit zugehöriger maximaler linker und rechter Position

Position in neuem Fahrstreifen und Fahrstreifennutzungsgrad

Die Position in dem neuen Fahrstreifen und der damit verbundene Fahrstreifennutzungsgrad ist bei jeder Parametervariation gleich.

Das Testfahrzeug fährt vor dem Überholvorgang auf dem rechten Fahrstreifen in einem Abstand von $1,875$ m zur Fahrbahnmittellinie und hat eine Fahrzeugbreite von $1,825$ m. Der Fahrstreifennutzungsgrad vor dem Überholvorgang lässt sich daher folgendermaßen berechnen:

$$\text{Fahrstreifennutzungsgrad} = \frac{3,75 \text{ m} - 1,875 \text{ m} + \frac{1,825 \text{ m}}{2}}{3,75 \text{ m}} * 100 \% = 74,3 \% \quad (4.1)$$

Das Ego-Fahrzeug nutzt also vom rechten Fahrbahnrand aus gerechnet $74,3$ % des Fahrstreifens. Beim Wechsel auf den linken Fahrstreifen nimmt es die Position $+1,875$ m ein. Der Fahrstreifennutzungsgrad wird in diesem Fall von der linken Fahrbahnbegrenzung aus berechnet, da sich das Fahrzeug auf dem äußeren linken Fahrstreifen befindet. Der Fahrstreifennutzungsgrad beträgt daher ebenso $74,3$ %.

Nach dem Überholen des langsameren Fahrzeugs wechselt das Ego-Fahrzeug wieder auf den ursprünglichen Fahrstreifen zurück, wo es in einem Abstand von $1,238$ m zur Fahrstreifenmittellinie fährt (Formel 4.2).

$$\text{Fahrstreifennutzungsgrad} = \frac{3,75 \text{ m} - 1,238 \text{ m} + \frac{1,825 \text{ m}}{2}}{3,75 \text{ m}} * 100 \% = 91,5 \% \quad (4.2)$$

Laut §2 der StVO soll ein Fahrzeug möglichst weit rechts fahren [56]. Der ideale Fahrstreifennutzungsgrad wäre daher bei diesem Fahrzeug aufgrund der Fahrzeugbreite von $1,82$ m bei rund 50 %.

4.2.2 Sicherheit

Zur Bewertung der Sicherheit dienen verschiedene objektive Kennwerte. Die Sicherheit stellt bei einem automatisierten Fahrzeug einen entscheidenden Beitrag zur Akzeptanz durch die Insassen dar. Ein regelkonformes Verhalten ist grundsätzlich von entscheidender Bedeutung für ein sicheres Fahren, daher können eine Kennwerte sowohl bei der Bewertung der Sicherheit, als auch bei der Regelkonformität verwendet werden.

Longitudinale Geschwindigkeit

Das Fahrzeug fährt zu Beginn eine Geschwindigkeit von 130 km/h, verringert beim Auffahren auf das vorausfahrende Fahrzeug seine Geschwindigkeit auf 120,2 km/h und beschleunigt anschließend während des Überholvorgangs auf bis zu 135,5 km/h. Nach dem Beenden des Überholvorgangs fährt es mit einer konstanten Geschwindigkeit von 130 km/h weiter. (Abbildung 4.2)

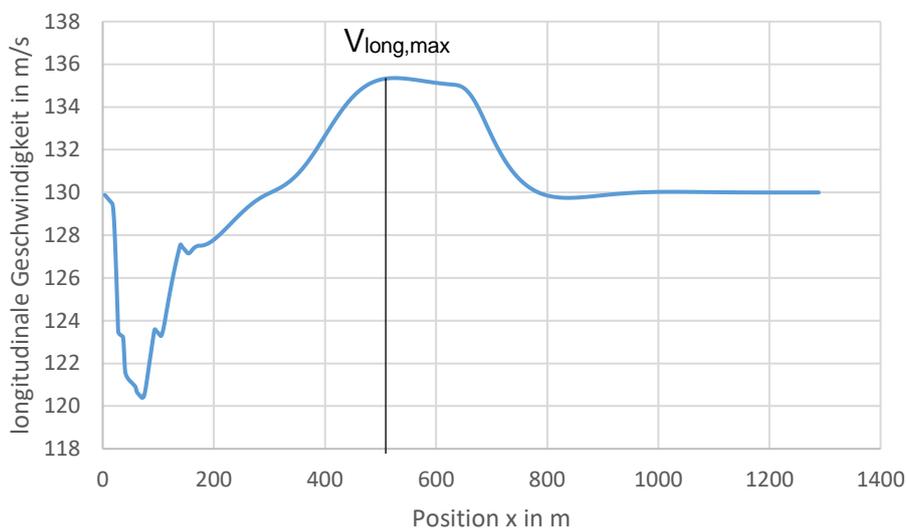


Abbildung 4.2: longitudinale Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs

Seitenabstand bei Vorbeifahrt

Der Seitenabstand zwischen den beiden Fahrzeugen beträgt in jeder Parametervariation bei Vorbeifahrt 1,925 m. In §5 der StVO ist dieser Abstand auf mindestens 1 m festgelegt und somit in Ordnung [56].

Längsabstand

Fährt das Testfahrzeug beispielsweise 130 km/h, so muss nach der 2-s-Regel bzw. der halben-Tacho-Regel der Sicherheitsabstand mindestens 65 m groß sein. Da das Ego-Fahrzeug eine höhere Geschwindigkeit als das vorausfahrende Fahrzeug, verringert sich der Abstand zwischen den beiden Fahrzeugen. Wie in Abbildung 4.3 dargestellt wird, fährt das Ego-Fahrzeug auf das langsamere Fahrzeug auf und wechselt bei dieser Parametervariante bei einem Abstand von 95 m den Fahrstreifen.

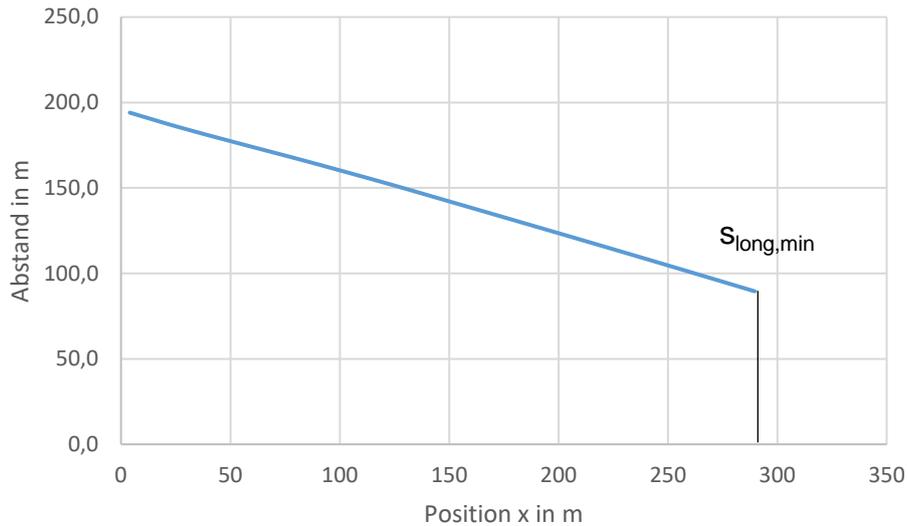


Abbildung 4.3: Abstand zwischen Ego-Fahrzeug und vorausfahrendem Fahrzeug bis zum Verlassen des Fahrstreifens

In Abbildung 4.4 ist der Sicherheitsabstand für alle Parametervariationen normiert auf 1 dargestellt. Das heißt, dass der erlaubte Sicherheitsabstand als eins verdeutlicht wird. Wird der Abstand unterschritten, ist der jeweiligen Balken niedriger als eins. Bei einem größeren Längs-abstand ist der Balken über eins. Desto höher die Geschwindigkeit des Testfahrzeugs ist, desto früher wechselt es den Fahrstreifen. Der Sicherheitsabstand ist folglich größer. Ist der Geschwindigkeitsunterschied gering und das vorausfahrende Fahrzeug beginnt zu bremsen, wird der erlaubte Sicherheitsabstand beinahe unterschritten. Bei höheren Geschwindigkeiten wechselt das Ego-Fahrzeug in einem größeren Abstand den Fahrstreifen. Die Bewertung des erlaubten Sicherheitsabstandes erfolgt rein über die gefahrene Geschwindigkeit des Fahrzeugs.

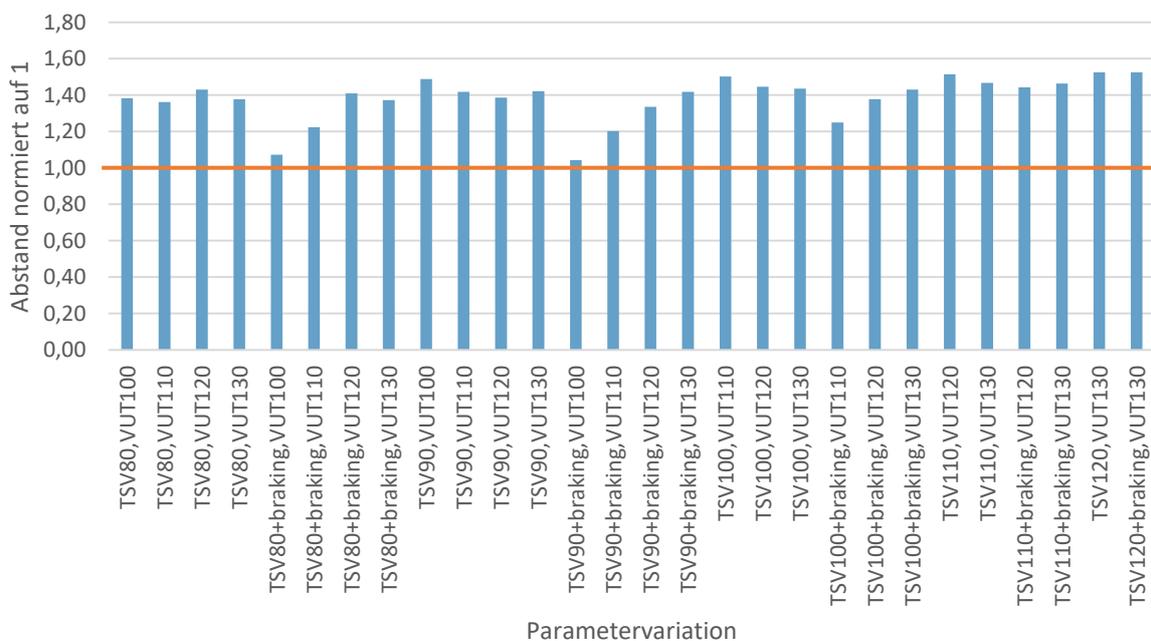


Abbildung 4.4: Abstand zwischen Ego-Fahrzeug und vorausfahrendem Verkehrsteilnehmer normiert auf 1

4.2.3 Fahrstil

Wie in Kapitel 3.7 festgelegt beruht die Einstufung des Fahrstils in der Literatur auf objektiven Kennwerten zur Beschleunigung. Das Ego-Fahrzeug aus dem Beispielszenario beschleunigt zu Beginn des Überholvorgangs mit einer maximalen Beschleunigung von $1,70 \text{ m/s}^2$, nachdem es beim Auffahren auf das vorausfahrende Fahrzeug verzögert hat. Nach dem Überholvorgang und dem Wiedereinscheren auf den rechten Fahrstreifen verzögert es kurzzeitig mit $0,58 \text{ m/s}^2$ (Abbildung 4.5).

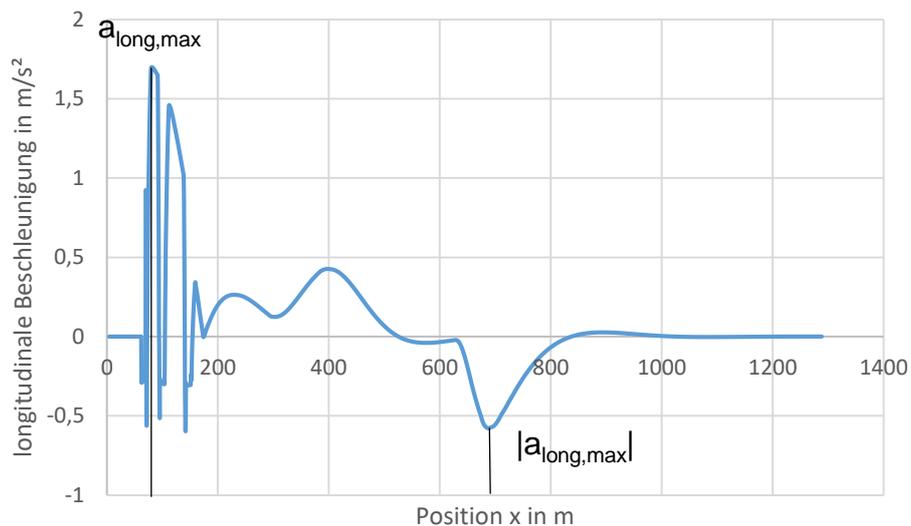


Abbildung 4.5: longitudinale Beschleunigung des Ego-Fahrzeugs

In der Ergebnisauswertung aller Parametervariationen wird das Verhalten in Bezug auf den Fahrstil farblich dargestellt. Ein grüner Bereich stellt dabei einen defensiven Fahrstil, ein grauer ein normales und ein roter ein aggressives Verhalten dar (Abbildung 4.6).

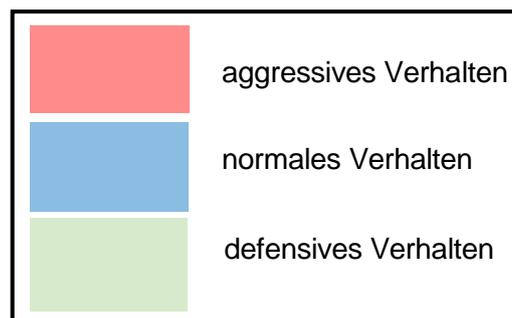


Abbildung 4.6: Farbsystem zur Darstellung des Fahrstils

Longitudinale Beschleunigung

Ein defensiver Fahrstil zeichnet sich, wie in Kapitel 3.7 beschrieben wird, durch longitudinale Beschleunigungen in Höhe von $1,4$ bis $2,0 \text{ m/s}^2$ aus. Die maximale longitudinale Beschleunigung liegt bei allen durchgeführten Parametervariationen dieses Szenarios in einem Bereich zwischen $1,14 \text{ m/s}^2$ und $1,85 \text{ m/s}^2$ und kann fast durchgängig einem defensiven Fahrstil zugeordnet werden (Abbildung 4.7).

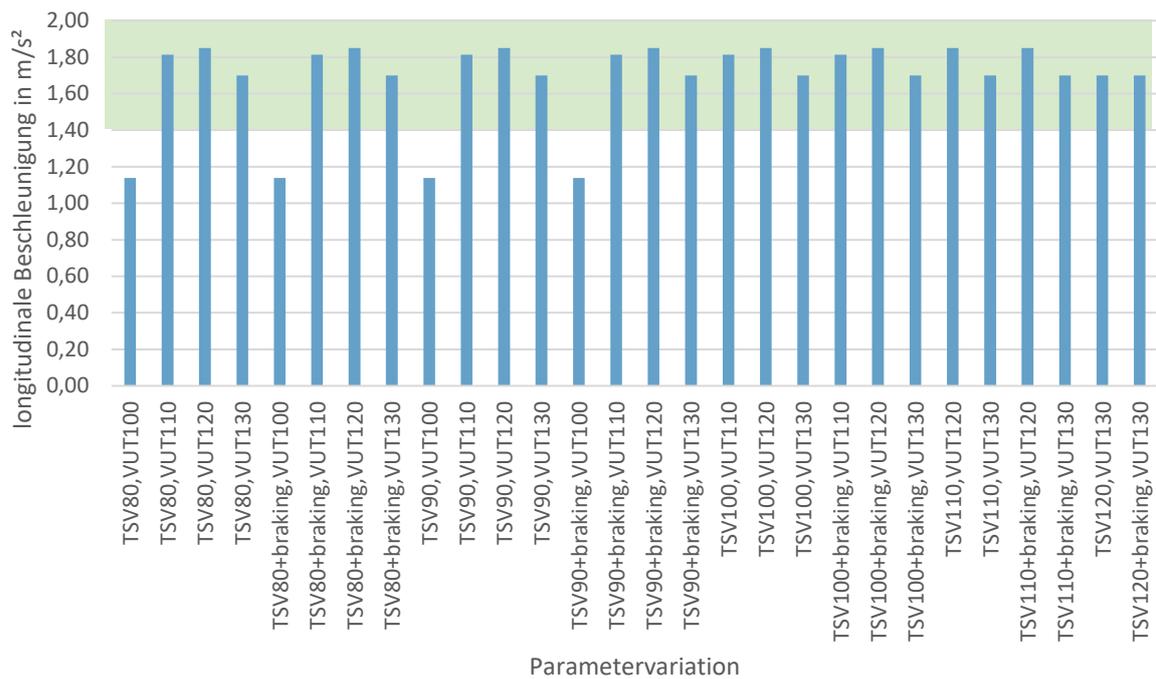


Abbildung 4.7: maximale longitudinale Beschleunigung des Ego-Fahrzeugs

Longitudinale Verzögerung

Die maximalen longitudinalen Verzögerungen der Variationen, die das Testfahrzeug bei Einscheren auf den rechten Fahrstreifen hat, sind alle in einem Bereich, der unterhalb eines defensiven Bremsverhaltens liegt. Ein defensives Verhalten tritt bei Verzögerungen ab $-1,4 m/s^2$ und weniger auf. In der ISO 15622:2018 wird der Grenzwert beschrieben, den eine maximale longitudinale Verzögerung über einen Zeitraum von 2 s aufweisen drauf. Aufgrund der deutlichen Unterschreitung des Wertes von $-3,5 m/s^2$ wird dieser Kennwert nicht berechnet. (Abbildung 4.8) [42]

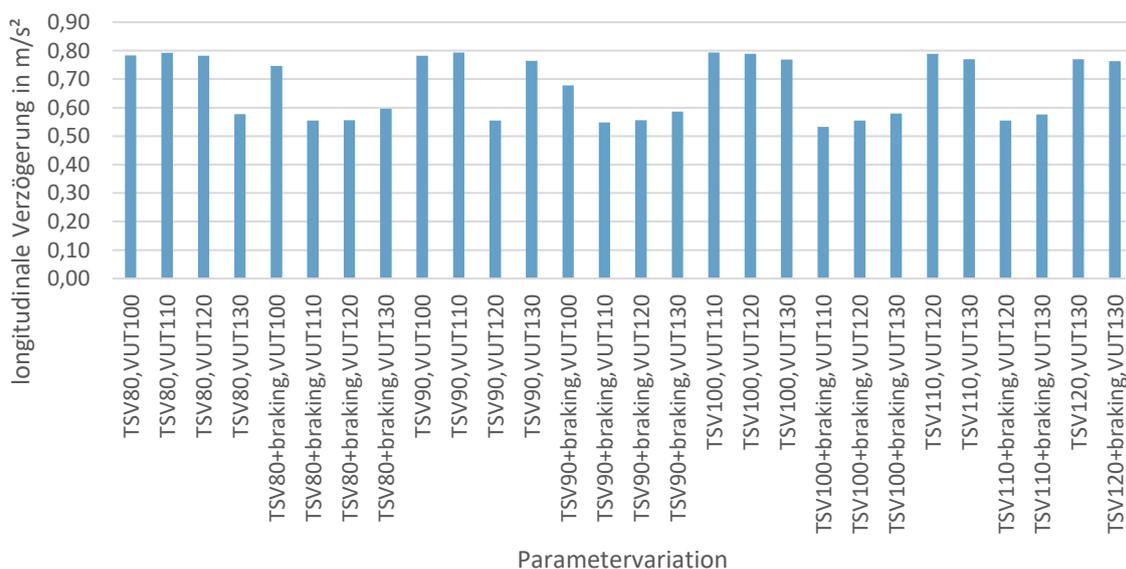


Abbildung 4.8: maximale longitudinale Verzögerung des Ego-Fahrzeugs

4.2.4 Fahrkomfort

Im Anschluss an die Bewertung des Fahrstils erfolgt nun die Beurteilung des Fahrkomforts. Grundlegend wird der wahrgenommene Komfort der Insassen durch die erfahrenen Beschleunigungen und den Ruck beschrieben.

Laterale Beschleunigung

Die laterale Beschleunigung liegt bei allen Variationen in einem niedrigen Bereich. Ein hoher Komfort herrscht, laut Definition in Kapitel 3.7, bei einer Querbeschleunigung bis $1,8 \text{ m/s}^2$. Bei der Parametervariante, bei der das Ego-Fahrzeug 130 km/h und das vorausfahrende Fahrzeug 80 km/h fährt, beträgt die laterale Beschleunigung in positiver Richtung, also in Fahrtrichtung nach links, maximal $0,43 \text{ m/s}^2$ und in negativer Richtung $-0,61 \text{ m/s}^2$. Grundsätzlich sind bei einem Fahrstreifenwechsellvorgang keine hohen Querbeschleunigungswerte zu erwarten. Aufgrund der niedrigen Querbeschleunigung ist eine Einordnung der Fähigkeiten in Bezug auf die lateralen Beschleunigungen nicht möglich (Abbildung 4.9).

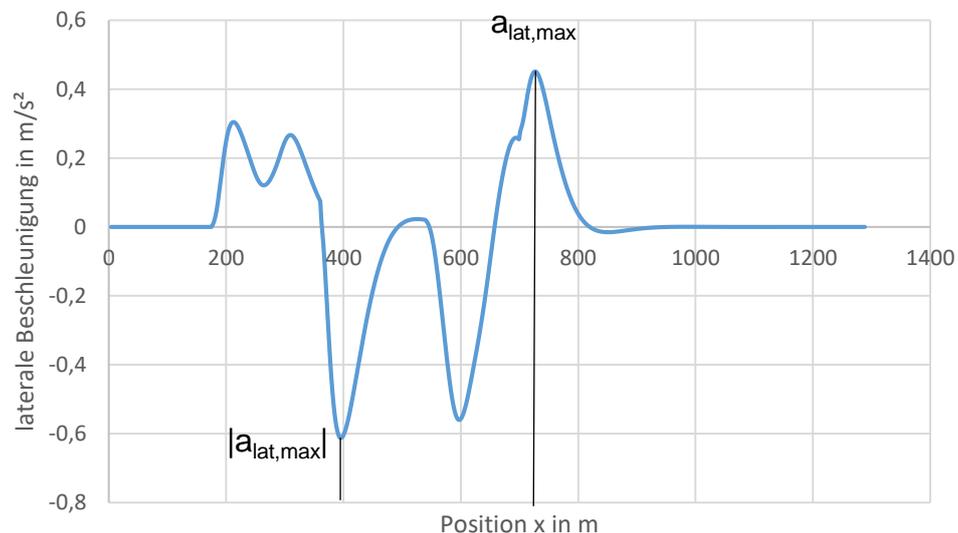


Abbildung 4.9: laterale Beschleunigung des Ego-Fahrzeugs

Die Querbeschleunigungen beim Fahrstreifenwechsel nach links liegen über alle Geschwindigkeitsbereiche hinweg nahe beieinander. Bei dem Wechsel nach rechts hingegen ist die Streuung größer. Des Weiteren sind die lateralen Beschleunigungen beim Fahrstreifenwechsel nach rechts grundsätzlich größer (Abbildung 4.10).

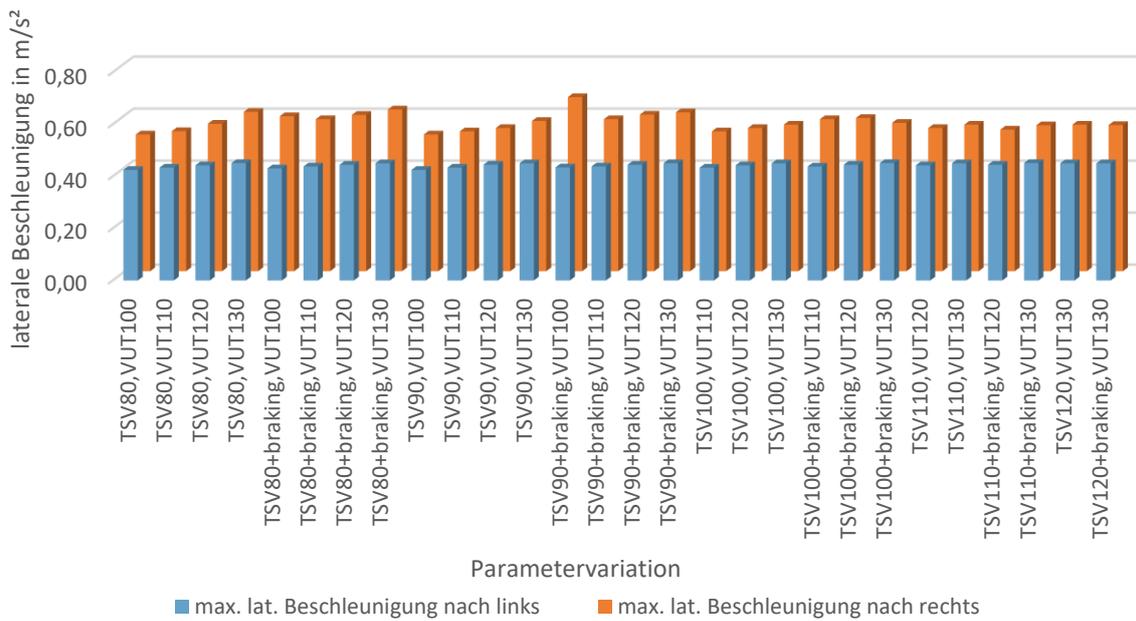


Abbildung 4.10: maximale laterale Beschleunigung des Ego-Fahrzeugs beim Fahrstreifenwechsel

Gleichmäßigkeit des Fahrstreifenwechsels

Die krümmungsminimale mittlere Beschleunigung eines Fahrstreifenwechsellvorgangs lässt sich mit der Formel 3.2 aus Kapitel 3.7 berechnen. In beinahe allen Parametervariationen liegt der real gefahrene Wert bei einem Wechsel nach Links deutlich höher als eins. Je niedriger der bestimmte Wert ist, desto komfortabler wird ein Fahrstreifenwechsellvorgang wahrgenommen (Abbildung 4.11).

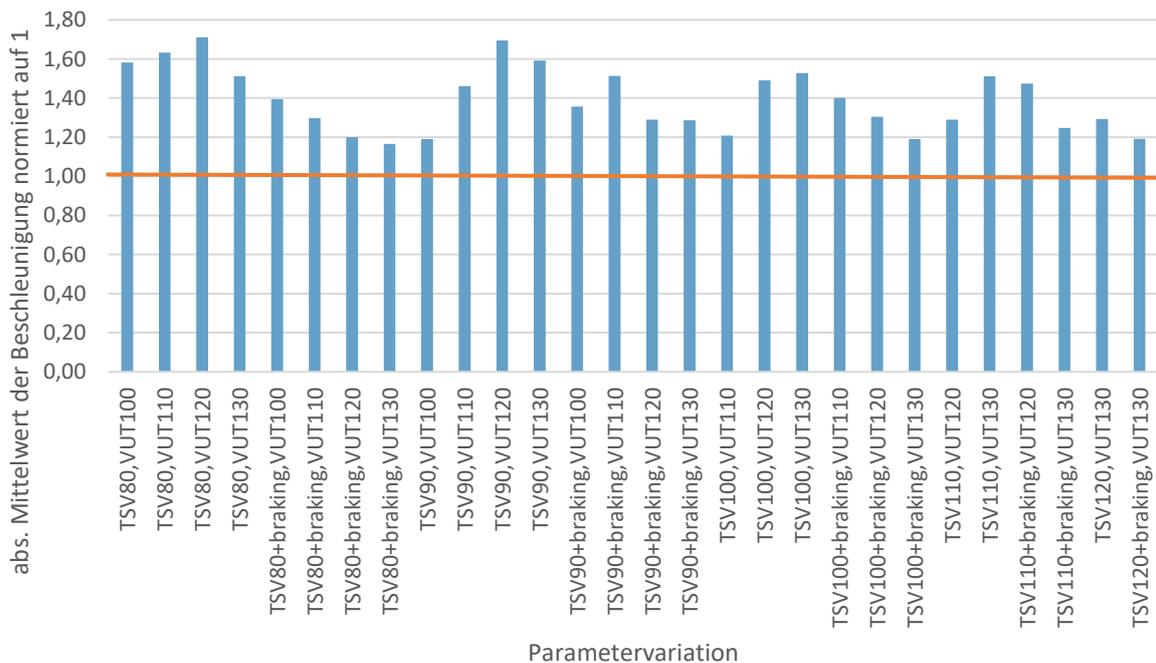


Abbildung 4.11: Gleichmäßigkeit des Fahrstreifenwechsels nach links normiert auf 1

Bei einem Fahrstreifenwechsel nach rechts verhält es sich in Bezug auf die Komfortwahrnehmung gleich wie bei einem Fahrstreifenwechsel nach links. Wie in Abbildung 4.12 zu erkennen ist, fallen die simulierten Werte überwiegend höher aus, als bei einem Wechsel nach links. Grund dafür ist, wie in Abbildung 4.1 dargestellt, dass das Fahrzeug erst über die endgültige y-Position hinausfährt und anschließend die Linienwahl anpasst.

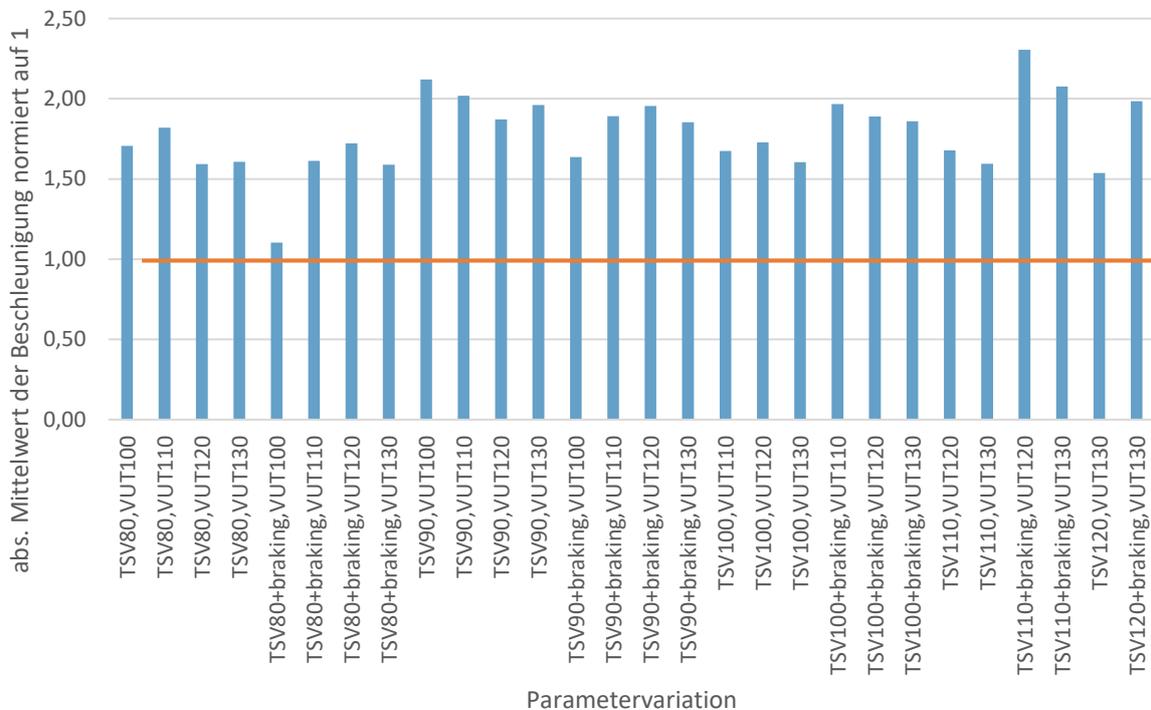


Abbildung 4.12: Gleichmäßigkeit des Fahrstreifenwechsels nach rechts normiert auf 1

Longitudinale Beschleunigung

Die Darstellung des Komfortniveaus erfolgt in der Ergebnisauswertung ebenfalls über ein Farbsystem. Ein hoher Komfort wird grün, ein mittlerer grau und ein geringer rot verdeutlicht (Abbildung 4.16).

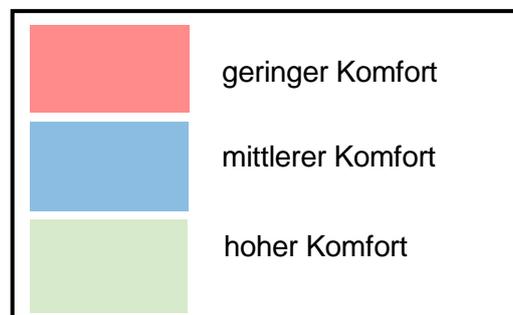


Abbildung 4.13: Farbsystem zur Darstellung des Komfortniveaus

Ein hohes Komfortempfinden wird bei Beschleunigungen bis 3,0 m/s² erzeugt. Die Maximalwerte der Parametervariationen liegen hier alle sogar unter 2,0 m/s². Die Beschleunigungswerte steigen bei den Variationen mit der Höchstgeschwindigkeit des VUT an. (Abbildung 4.14)

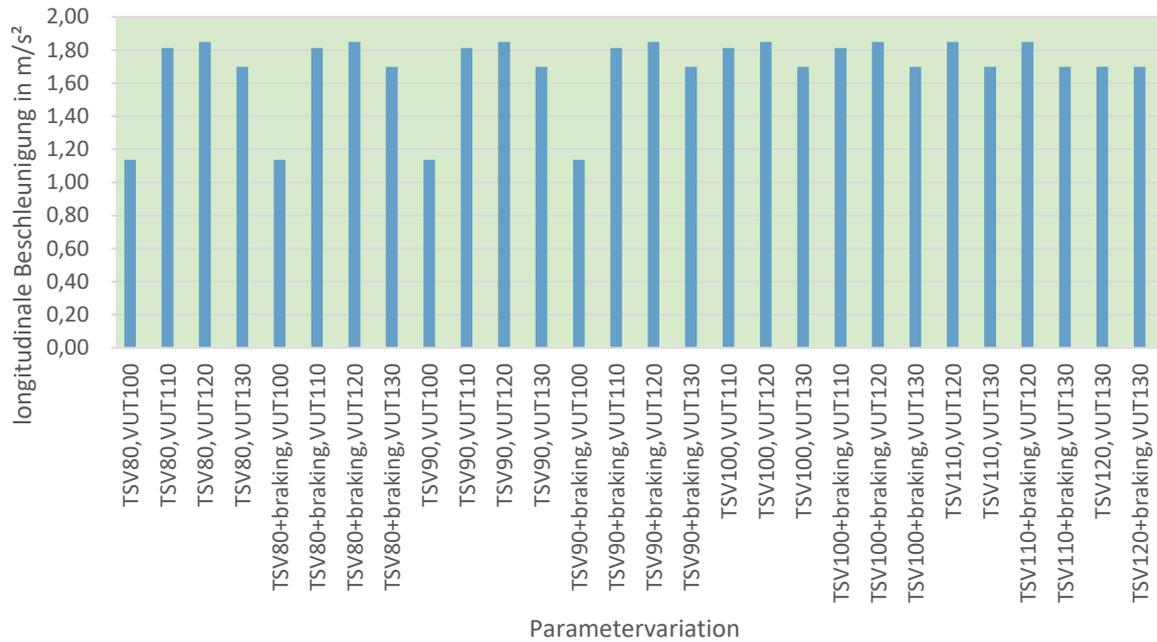


Abbildung 4.14: maximale longitudinale Beschleunigung des Ego-Fahrzeugs

Longitudinale Verzögerung

Ein ähnliches Verhalten zeigt sich in Abbildung 4.15 bezüglich der longitudinalen Verzögerung. Die Höchstwerte liegen unter $2,5 m/s^2$. Dieser Wert stellt die Obergrenze eines hohen Komfortniveaus dar. Das heißt, dass das Fahrzeug durchweg ein hohes Komfortniveau hat.

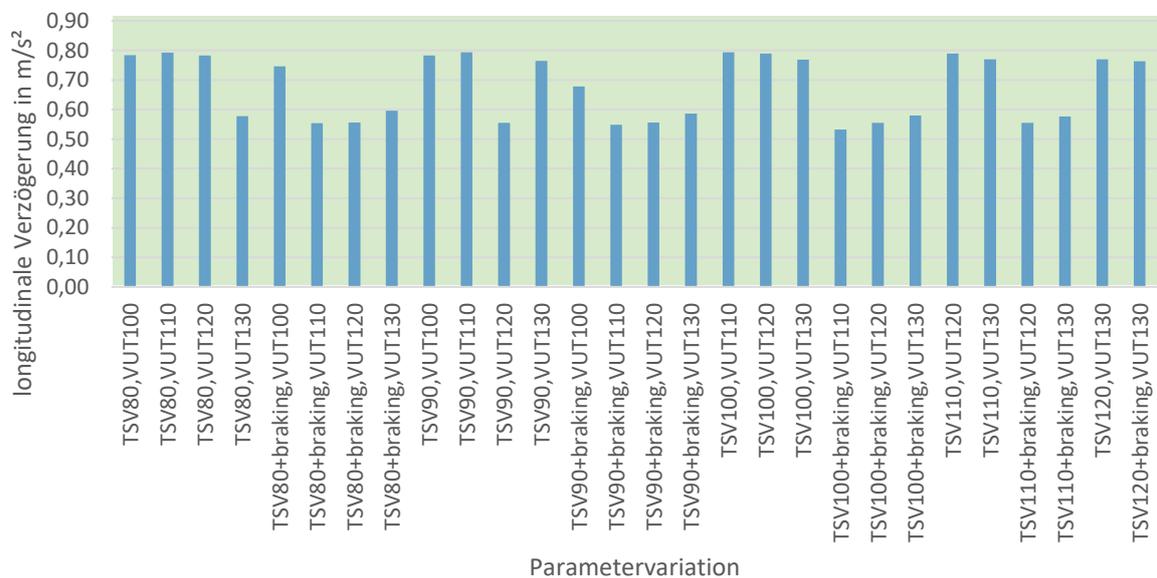


Abbildung 4.15: maximale longitudinale Verzögerung des Ego-Fahrzeugs

Longitudinaler Ruck

Der longitudinale Ruck bei einem Bremsvorgang darf nach ISO 15622:2018 über einen gleitenden Mittelwert von 1s nicht über $2,5 m/s^3$ sein. Bei der dargestellten Parametervariation hat der

4 Ergebnisse

maximale longitudinale Ruck einen Höchstwert von $1,3 \text{ m/s}^3$ und einen minimalen Wert von $2,2 \text{ m/s}^3$, was einem normalen Komfortniveau zugeordnet werden kann.

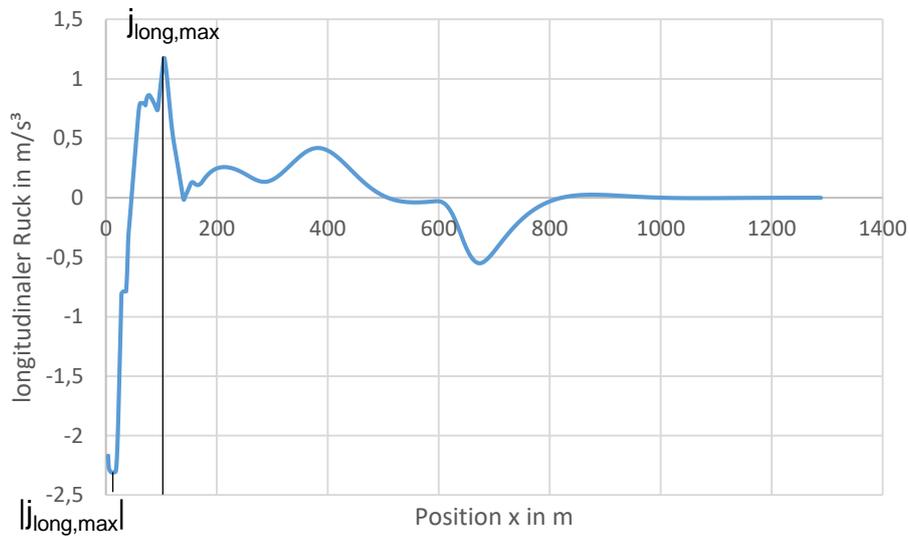


Abbildung 4.16: max. gleitender Mittelwert über 1 s des longitudinalen Rucks

Die Darstellung des auftretenden longitudinalen Rucks wird in Abbildung 4.17 auf den Wert eins bezogen. Alle Werte sind dabei unter der Grenze eins, was die Erfüllung der oben erwähnten Iso-Norm bedeutet. Ist die Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs niedriger, ist auch der longitudinale Ruck niedriger. Mit höherer Geschwindigkeit steigt dieser in einen ähnlichen Bereich an. Der Wert eins kann in dieser Auswertung einem normalen, als angenehm wahrgenommenen Fahrstil zugeordnet werden [42].

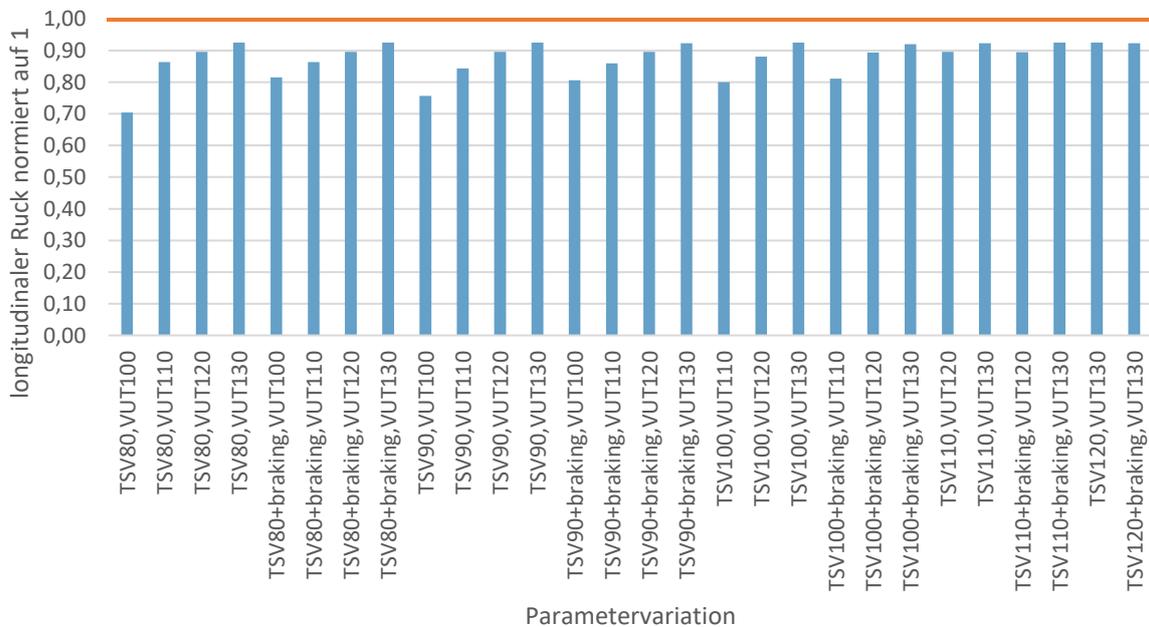


Abbildung 4.17: maximaler gleitender Mittelwert über 1 s des longitudinalen Rucks der Verzögerung normiert auf 1

Lateraler Ruck

In der UNECE R79 wird der laterale Ruck durch den maximalen gleitenden Mittelwert über einen Zeitraum von 0,5 s beschrieben. Der Grenzwert dafür liegt bei 5 m/s^3 . Der gleitende Mittelwert über 0,5 s des lateralen Rucks liegt bei der dargestellten Parametervariation bei $0,48 \text{ m/s}^3$ in positiver Richtung und bei -1 m/s^3 in negativer Richtung. Das bedeutet, dass die ermittelten Werte einem hohen Komfortniveau entsprechen. (Abbildung 4.18)

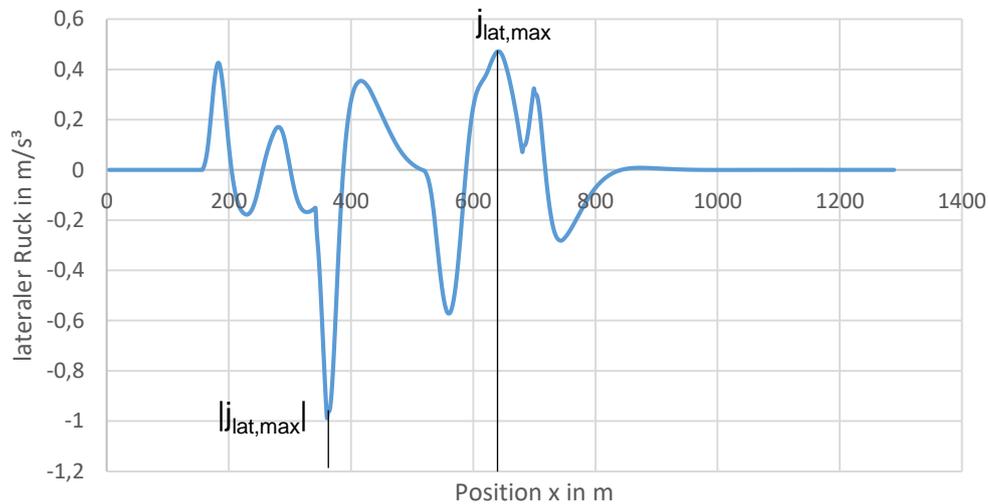


Abbildung 4.18: gleitender Mittelwert über 0,5 s des lateralen Rucks des Ego-Fahrzeugs

Keine der simulierten Parametervariationen liegt in dem Bereich, den die UNECE R79 begrenzt. Der laterale Ruck bei einem Fahrstreifenwechsel nach links ist in allen Variationen in einem gleichbleibend niedrigen Bereich. Der Fahrstreifenwechsel zurück auf den rechten Streifen ist immer mit einem höheren Ruck verbunden. Ebenso steigt der Wert teilweise bei höheren Geschwindigkeiten an. Der erfahrene Ruck kann jedoch in allen Parametervariationen als sehr komfortabel wahrgenommen werden, da die Werte deutlich unter dem Wert von 5 m/s^3 , wie es in der UNECE R79 festgelegt wird, sind. (Abbildung 4.19) [41]

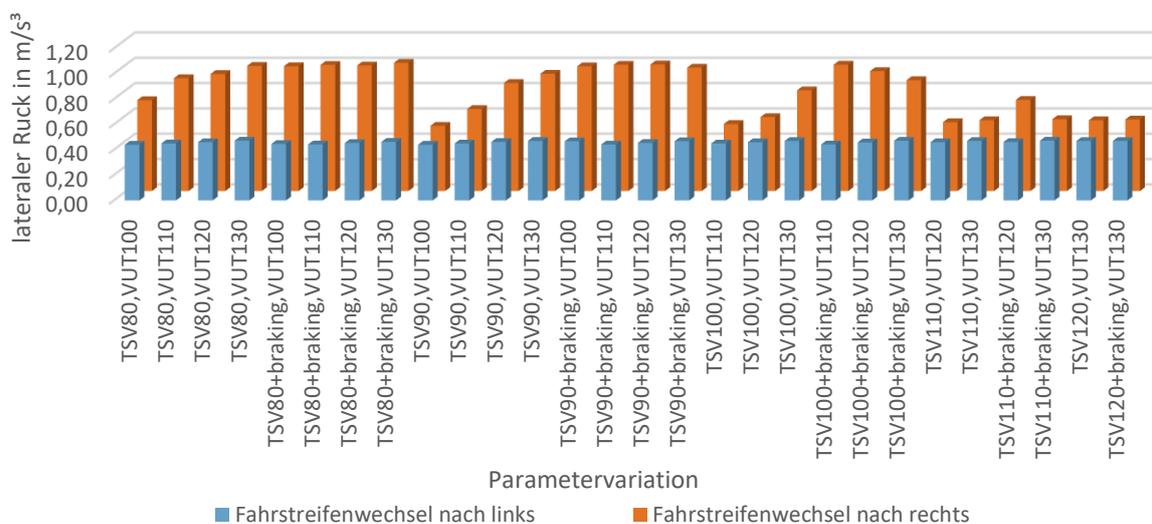


Abbildung 4.19: maximaler gleitender Mittelwert über 0,5 s des lateralen Rucks bei einem Fahrstreifenwechsel

4.3 Schwachstellen des Systems und mögliche Anpassungen des Szenarios

Nachdem alle Kennwerte bestimmt sind, lassen sich eventuelle Schwachstellen des Systems aus den berechneten Fähigkeiten ermitteln.

4.3.1 Schwachstellen des Systems

Grundsätzlich ist zu erkennen, dass das System bezogen auf die Sicherheit und das regelkonforme Verhalten keine großen Schwachstellen aufweist. Wie in Abbildung 4.1 und Kapitel 4.3.1 erläutert, fährt das Fahrzeug nach dem Überholvorgang nicht in die Fahrstreifenmitte zurück, sondern fährt näher an der Fahrbahnmittellinie. Das Rechtsfahrgebot, das besagt, dass ein Fahrzeug möglichst weit rechts auf dem Fahrstreifen zu fahren hat, wird nicht eingehalten. Eine Bestrafung sieht die StVO jedoch für dieses Handeln nicht vor. Die Fahrfunktion, die in der Simulation verwendet wird, nimmt bei jeder Parametervariation die gleichen Positionen innerhalb der beiden Fahrstreifen ein.

Die lateralen Beschleunigungen bei dem Wechsel des Fahrstreifens sind nach rechts höher als nach links. Ebenso sind auch die Werte bei der Gleichmäßigkeit des Fahrstreifenwechsels nach rechts höher. Ein Fahrstreifenwechsel nach rechts, hat dadurch ein niedrigeres Komfortniveau.

Der gleitende Mittelwert über 0,5 s des lateralen Rucks ist bei dem Fahrstreifenwechsel nach rechts immer deutlich größer als nach links. Das Komfortniveau ist folglich beim Einscheren nach rechts niedriger als beim Ausscheren.

4.3.2 Mögliche Anpassungen des Szenarios

Aus den bestimmten Kennwerten und die damit verbundenen Schwachstellen des Systems lassen sich die Szenarien dahingehend anpassen, dass eine Eigenheit der Fahrfunktion genauer überprüft werden kann.

Das Ego-Fahrzeug leitet mit sehr großem Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug den Fahrstreifenwechsel ein. Interessant ist das Verhalten des Fahrzeugs, wenn ein weiteres Fahrzeug auf dem linken Fahrstreifen mit hoher Geschwindigkeit heranfährt (Abbildung 4.20).

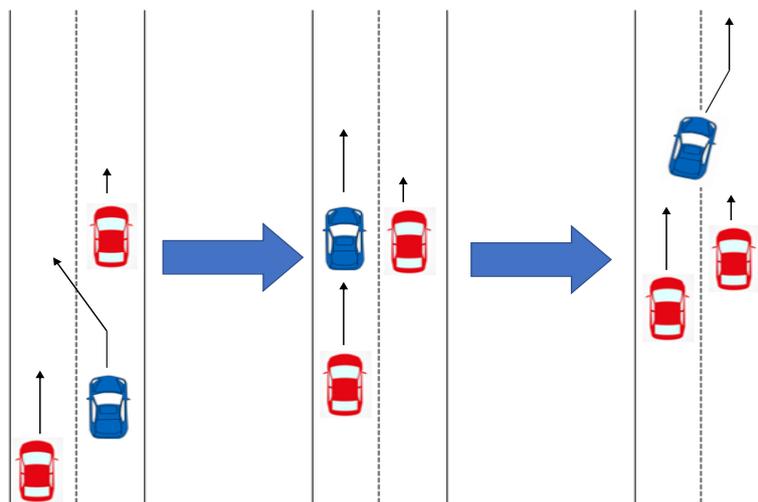


Abbildung 4.20: Anpassung des Szenarios Überholvorgang

Des Weiteren ist von Interesse, wie das Ego-Fahrzeug reagiert, wenn beispielsweise das zu überholende Fahrzeug einen Versatz in Richtung Fahrbahnmittellinie durchführt. Bei allen simulierten Parametervariationen ist Position des Ego-Fahrzeugs auf dem linken Fahrstreifen und damit der Seitenabstand zwischen den beiden Fahrzeugen immer gleich. Eine Abweichung kann auftreten, wenn das beteiligte Fahrzeug nach links in Richtung der Fahrbahnmittellinie abweicht. (Abbildung 4.21)

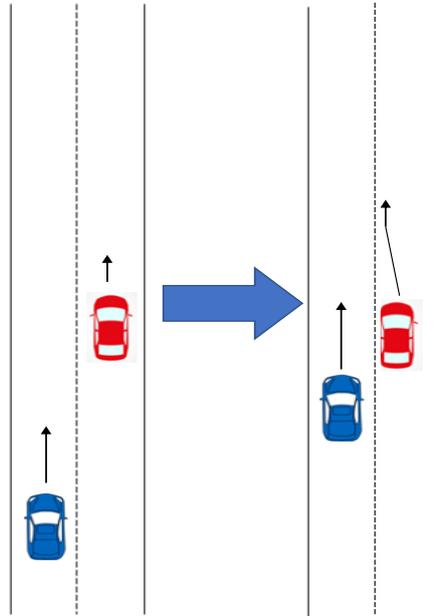


Abbildung 4.21: weitere Anpassung des Szenarios Überholvorgang

4.4 Weitere simulierte Szenarien

Neben dem Szenario Überholvorgang werden drei weitere Szenarien simuliert, die nach der gleichen Vorgehensweise ausgearbeitet werden. Es erfolgt ebenso die Bestimmung relevanter Kennwerte zur Bewertung der Fähigkeiten in Bezug auf Sicherheit, Regelkonformität, Fahrkomfort und Fahrstil. Nachfolgend sind die wichtigsten Aussagen dieser Szenarien erklärt.

4.4.1 TestszENARIO: μ -Split

In dem Szenario weicht das Fahrzeug einem Hindernis am Fahrbahnrand aus. Der Fahrstreifen hat dabei auf der rechten Hälfte einen anderen Reibwert als links. Simuliert werden links und rechts Reibwerte zwischen $\mu = 0,1$ und $\mu = 0,6$. In Abbildung 4.22 sind die Parametervariationen über Symbole dargestellt. Bis zu einer Geschwindigkeit von 80 km/h kann das Fahrzeug dem Hindernis ausweichen. Bei einem niedrigen Reibwertunterschied kann das Fahrzeug dem Hindernis nicht mehr ausweichen bzw. rechtzeitig bremsen und es kommt zum Crash, obwohl das Fahrzeug früh zu bremsen beginnt. Bei einer größeren Differenz kommt es ebenfalls zum Unfall, das Fahrzeug gerät jedoch zusätzlich ins Schleudern. Außerdem verlässt es die Fahrbahn. In Bezug auf die Sicherheit des Systems stellt dies eine große Schwachstelle dar. In Der Abbildung stellen die Symbole eine Parametervariante dar. Es wird der linke und der rechte Reibwert angegeben.

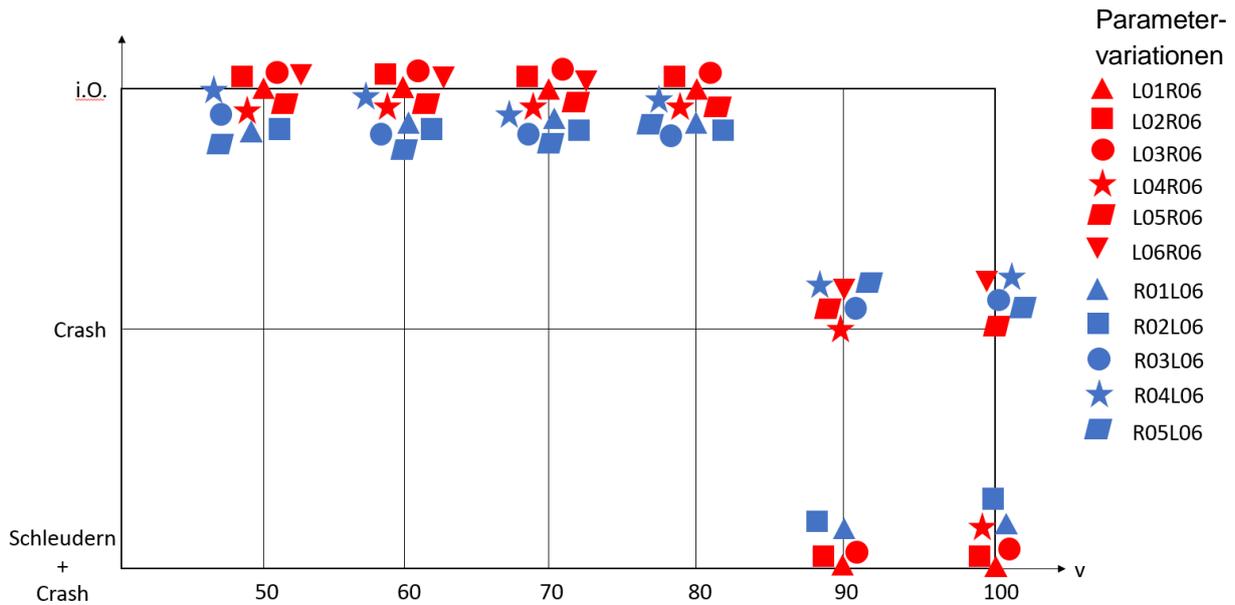


Abbildung 4.22: Ergebnisse aus dem Szenario μ -split: Sicherheitsrisiko - Kollision und Schleudern tritt ab 90 km/h

In weiteren Parametervariationen lässt sich untersuchen wie sich das Fahrzeug verhält, wenn die Differenz zwischen dem linken und dem rechten Reibwert größer wird. Ein unsicheres Verhalten tritt möglicherweise schon bei niedrigeren Geschwindigkeiten auf. Weiter lässt sich betrachten, wie die Fahrfunktion reagiert, wenn das Hindernis plötzlich erscheint und eine schnelle Reaktionszeit gefordert wird. Des Weiteren kann ein entgegenkommendes Fahrzeug ein Ausweichmanöver unterbinden, wodurch das Fahrzeug gezwungen ist eine Kollision mit dem Hindernis durch starkes Bremsen zu vermeiden.

4.4.2 TestszENARIO: S-Kurve

Im diesen Szenario durchfährt ein Fahrzeug eine S-Kurve mit verschiedenen Geschwindigkeiten und Kurvenradien. Es soll beobachtet werden, wie das Fahrzeug dem Kurvenverlauf folgt. Möglicherweise überfährt es die Fahrbahnmittellinie in der Kurve.

In der Ergebnisauswertung zeigt sich, dass das Fahrzeug immer innerhalb des eigenen Fahrstreifens bleibt. Wie in Abbildung 4.23 sinnbildlich dargestellt wird, nähert es sich den Fahrstreifenbegrenzungslinien, überfährt diese aber nicht. In allen Parametervariationen weicht das Fahrzeug im Kurveneingang nach rechts ab und fährt anschließend in Richtung Fahrbahnmittellinie. Im Kurvenausgang weicht das Fahrzeug erneut nach rechts ab. Hat das Fahrzeug eine höhere Masse, vergrößern sich die Abweichungen zur Kurveninnenseite hin und der Abstand zur Fahrbahnmittellinie verringert sich. Eine Schwachstelle des Systems zeigt sich in der Abweichung des Fahrzeugs von der Fahrstreifenmitte. Wie in Abbildung 4.23 zu erkennen ist, entsteht eine unsichere Situation, wenn das Fahrzeug nach links in Richtung der Fahrbahnmitte fährt. Ein entgegenkommendes Fahrzeug, das sich nur leicht über der Fahrbahnmittellinie befindet, könnte zu einer Unfallsituation führen. Weiter ist zu untersuchen, wie sich das Fahrzeug verhält, wenn am Kurveneingang sich ein Hindernis am rechten Fahrbahnrand befindet.

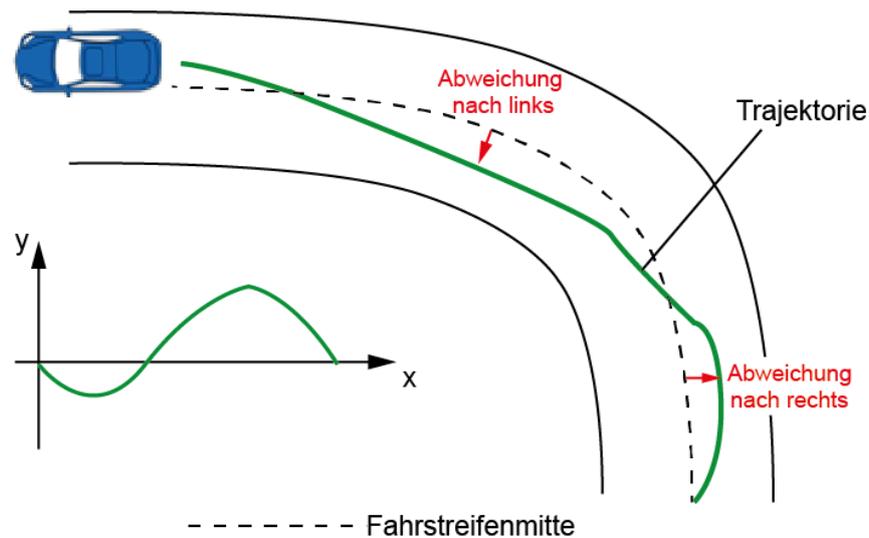


Abbildung 4.23: sinnbildliche Darstellung zur Abweichung des Fahrzeugs von der Fahrstreifenmitte [29]

4.4.3 Testszenario: Stopp & Go

Als viertes Testszenario wurde das Folgefahrverhalten eines Fahrzeugs in einer Stopp & Go-Situation untersucht. Ein vorausfahrendes Fahrzeug bremst und beschleunigt in regelmäßigen Abständen. Untersucht werden soll das Beschleunigungs- und Abstandsverhalten des sich dahinter befindlichen Fahrzeugs.

In der Ergebnisauswertung ist zu erkennen, dass das Fahrzeug in Bezug auf Fahrstil und -komfort bei Beschleunigungswerten grundsätzlich ein normales Verhalten aufzeigt. Der minimale Längsabstand zwischen den beiden Fahrzeugen wird mit zunehmender Periodenanzahl größer. Dieses Verhalten entsteht dadurch, dass das Ego-Fahrzeug nicht den gleichen Beschleunigungsverlauf wie das vorausfahrende Fahrzeug abfährt. Auffällig ist jedoch, dass der erlaubte Sicherheitsabstand in allen Parametervariationen auch unterschritten wird (Abbildung 4.24). Eine Unterschreitung des Sicherheitsabstandes stellt ein entscheidendes Sicherheitsdefizit dar, woraus Unfallsituationen entstehen können. Bremsst das vorausfahrende Fahrzeug bereits während das Ego-Fahrzeug dahinter noch beschleunigt, wird der Abstand noch deutlicher verringert. Tritt beispielsweise ein transients Bremsverlauf des vorausfahrenden Fahrzeugs auf, kann es bereits zu einer Kollision kommen. Im weiteren Verlauf lässt sich überprüfen, ob der Abstand zwischen den beiden Fahrzeugen weiter unterschritten wird, wenn der vorausfahrende Pkw zwar konstant, aber stärker bremst.

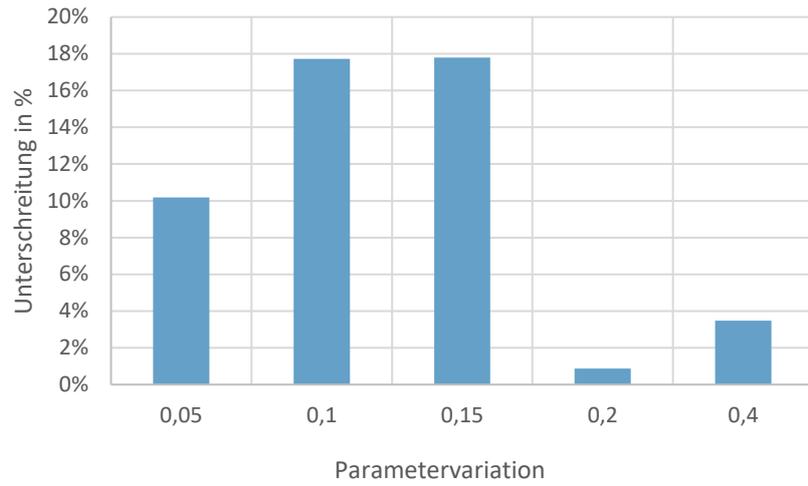


Abbildung 4.24: Unterschreitung des Sicherheitsabstands zwischen dem Ego-Fahrzeug und dem vorausfahrenden Fahrzeug in Prozent

5 Diskussion der Ergebnisse

Nachdem in Kapitel 4 die Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgt, werden nachfolgend die Ergebnisse diskutiert.

Die Auswertung beruht rein auf Messdaten aus der Simulation. Idealerweise sind Modelle real verfügbarer Fahrzeuge in der Simulationsumgebung vorhanden, wodurch Messwerte validiert und Kennwerte verglichen werden können.

Die Bewertung der Fähigkeiten des Fahrzeugs erfolgt nach den vorgegebenen Kennwerten. Das Verhalten beim Durchfahren einer Kurve zeigt kein unsicheres Verhalten. Zu Testzwecken wird die Masse des Fahrzeugs verdoppelt, um ein verändertes Verhalten abzubilden. Das Fahrzeug zeigt dabei ein ähnliches Verhalten wie in den vorherigen Durchgängen. Es erfolgt jedoch hier nur eine Änderung des Fahrdynamikmodells. Ziel ist jedoch ein zweites System eines Spurhalteassistenten zu testen. Es soll also idealerweise eine Änderung der Fahrfunktion erzeugt werden.

In dem Testszenario Stopp & Go wird versucht, durch ein regelmäßiges Beschleunigen und Abbremsen des vorausfahrenden Fahrzeugs eine Phasenverschiebung zu dem Ego-Fahrzeug so zu erzeugen, dass aufgrund eines zu geringen Abstands eine Unfallsituation entsteht. Die Fahrfunktion in der Simulation zeigt jedoch das Verhalten, dass mit zunehmender Periodenzahl sich der Abstand zwischen den beiden Fahrzeugen vergrößert.

Bei dem Testszenario Überholvorgang wechselt das Fahrzeug frühzeitig den Fahrstreifen. Der Sicherheitsabstand wird in keiner Parametervariation unterschritten. Durch eine Änderung der longitudinalen Verzögerung des vorausfahrenden Fahrzeugs auf 8 m/s^2 kann ebenso keine Unterschreitung des Sicherheitsabstands erzeugt werden. Ein hervorrufen einer kritischen Situation aufgrund dieser Verhaltensweise ist daher nicht möglich.

Ebenso ist die Einordnung in der Metrik nicht allgemeingültig. Bremst beispielsweise ein defensives Fahrzeug, obwohl kein Verzögerung notwendig ist, kann dies fälschlicherweise einem normalen oder aggressiven Fahrstil zugeordnet werden.

Die Beurteilung der Sicherheit des Fahrverhaltens erfolgt rein über festgelegte objektive Kennwerte. Die Wahrnehmung und Beurteilung der Sicherheit findet bei beteiligten Personen jedoch auch auf einer subjektiven Ebene statt. Auch die Bewertung eines Fahrschülers durch die Führerscheinrichtlinie ist größtenteils objektiv. In der Führerscheinprüfung werden bestimmte Fehler bis zu einer bestimmten Anzahl akzeptiert, andere führen jedoch zu einem sofortigen Nichtbestehen. Außerdem wird die Bewertung nicht kleinlich ausgelegt. [46]

Die Bewertung des Fahrkomforts für automatisierte Fahrzeuge erfolgt derzeit in der Forschung und Literatur kaum. Das Komfortempfinden aus Sicht des Fahrers lässt sich nur bedingt auf weitere Fahrzeuginsassen übertragen. Des Weiteren ist die Beurteilung des Fahrstils aus Sicht der Insassen meist subjektiv. Ein Fahrer, der beispielsweise selbst einen sportlichen Fahrstil

aufweist, erwartet meist von einem automatisierten Fahrzeug einen ähnlichen Fahrstil [40, S. 78].

In dieser Arbeit wurden exemplarisch nur eine geringe Anzahl an Szenarien simuliert. Um eine allgemeingültige Aussage über das Fahrzeug treffen zu können, werden mehr Szenarien benötigt. Dadurch lassen sich Schwachstellen mehr verdeutlichen und eine genauere Anpassung wird ermöglicht. Eine Betrachtung weiterer Parameter ist ebenfalls von Bedeutung. Die Fahrbahn einer Straße weist üblicherweise immer eine Querneigung auf, woraus unter anderem auch eine Querkraft bei Geradeausfahrt resultiert, die einen Einfluss auf das Fahrverhalten haben kann.

Der Aufbau der Fahrbahn erfolgt nach dem OpenSCENARIO-Format. In dem Szenario, bei dem das Testfahrzeug eine S-Kurve durchfährt, wird der Parameter Kurvenradius mit einem konkreten Wert angegeben. In den Richtlinien für die Anlage von Straßen werden Klothoiden beschrieben, die einen Übergangsbereich von der Geraden zu dem konkreten Kurvenradius darstellen. Bei der Fahrbahn in der Simulationsumgebung wird jedoch keine Klothoide verwendet. Erkennen kann man dies an dem sprunghaften Anstieg der Krümmung zu Kurvenbeginn. Bei dem Übergang von der Links- in die Rechtskurve erfährt die Krümmung ebenfalls einen sprunghaften Wechsel (Abbildung 5.1) [57, S. 109].

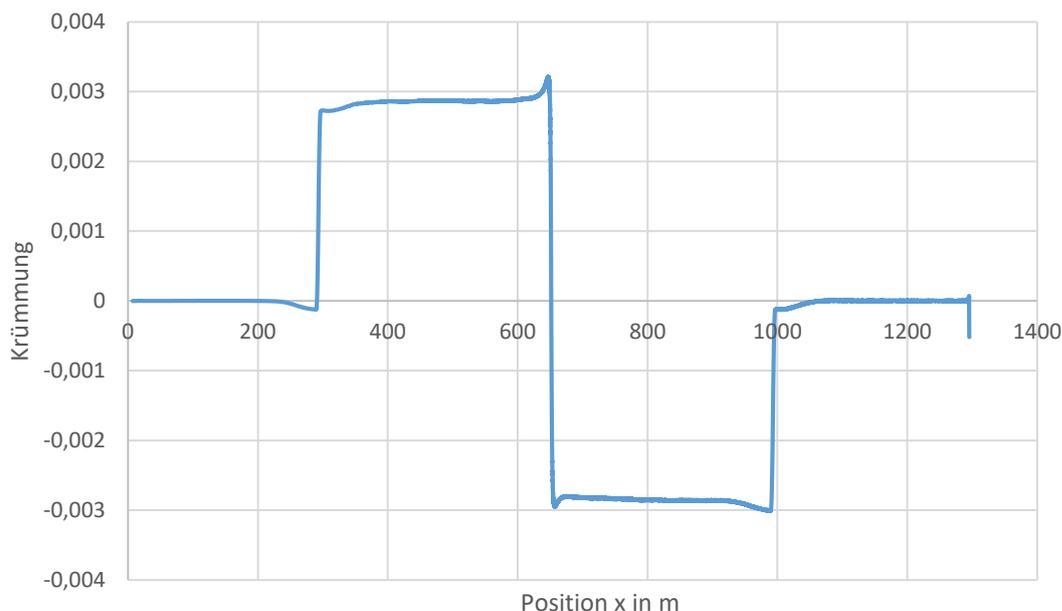


Abbildung 5.1: Krümmung der Fahrbahn einer S-Kurve mit dem Kurvenradius 350 m

Die Szenariobeschreibung ist auf eine möglichst einfache Verständlichkeit hin optimiert. Dadurch werden zusätzliche Erklärungen bei der Übergabe an die Simulationsabteilung vermieden. Die Beschreibung ist jedoch nicht standardisiert, wodurch sich diese nur schwer in bereits vorhandene Datenbanken einordnen lassen. OpenDRIVE [64] und OpenSCENARIO [65] beispielsweise sind Datenformatspezifikationen, welche die logische Beschreibung zwar standardisiert, jedoch nicht auf eine leichte Verständlichkeit hin angepasst sind.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend werden noch einmal kurz und prägnant die Zielsetzung, der Aufbau und das Vorgehen der Arbeit zusammengefasst sowie in einer Art Ausblick mögliche Optimierungen angesprochen.

6.1 Zusammenfassung

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist die objektive Charakterisierung des Fahrverhaltens automatisierter Fahrzeuge. Die Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise bildet die Grundlage, um relevante Szenarien zu bestimmen. Ausgehend von diesem Modell lässt sich das Fahrverhalten bewerten und wichtige Aspekte können näher beleuchtet werden.

Zu Beginn der Arbeit wird im zweitem Kapitel ein Überblick zum aktuellen Stand der Wissenschaft gegeben. In diesem Abschnitt werden die verschiedenen Stufen der Automatisierung und wichtige grundlegende Definitionen erläutert. Mit Hilfe aktueller Literatur wird beschrieben, welche Fahrstile existieren und wie diese festgelegt sind. Ebenso wird dargestellt, wie das Fahrverhalten eines Fahrers, aber auch eines Fahrzeugs, bewertet werden kann. Die Grundlage für die Ermittlung der relevanten Szenarien des Katalogs bilden Forschungsansätze, Literatur und Regelwerke, die ebenso in dem zweiten Kapitel erläutert werden.

Anschließend werden relevante Szenarien ermittelt. Genau beschreiben und einordnen lassen sich diese durch entsprechende Parameter. Eine Bewertung erfolgt anhand vorgegebener Kenn- und Grenzwerte. Ebenso lassen sich mit bestimmten Szenarien entsprechende Eigenschaften der Fahrfunktion näher beleuchten. Ferner werden die Fähigkeiten des Fahrzeugs in Bezug auf Sicherheit, Fahrstil, Fahrkomfort und Regelkonformität mit objektiven Kennwerten bestimmt.

Im vierten Kapitel wird auf der Grundlage des Vorgehensmodells eine Aussage über das Fahrverhalten getroffen. Ebenso lassen sich daraus Schwachstellen des Systems ermitteln. Die beurteilten Szenarien lassen sich dahingehend verändern, dass explizit die Eigenheiten eines Systems bzw. Fahrzeugs überprüft werden. Das Verhalten des Fahrzeugs wird einem Vergleich mit den Kriterien aus der Prüfungsrichtlinie für den Führerschein unterzogen.

Diese Arbeit will einen Grundstein für die objektive Fahrverhaltenscharakterisierung automatisierter Fahrzeuge legen. Die Bestimmung objektiver Kennwerte dient hierbei zur Feststellung von Fahrzeugeigenschaften. Durch die Zuordnung dieser Eigenschaften zu bekannte Größen lassen sich verschiedene Systeme vergleichen.

6.2 Ausblick

Diese Arbeit beinhaltet ein Konzept zur objektiven Charakterisierung des Fahrverhaltens. Die Ausarbeitung der Szenarien für die Simulationsabteilung umfasst einen gewissen Parameterraum, der für die Bewertung herangezogen wird. Dieser kann erweitert werden, wodurch sich unter Umständen ein bestimmtes Verhalten herauskristallisieren lässt, das nur in bestimmten Bereichen auftritt.

Im Hinblick auf die Umsetzung und Durchführung der Szenarien existieren noch offene Punkte. Als Testmethode für die Durchführung der ausgewählten Szenarien dient eine Simulation. Das Fahrverhalten in der Simulation kann jedoch idealerweise mit Realversuchen auf einem Testgelände verglichen werden. Hierzu wird jedoch neben umfangreicher Messtechnik ein Fahrzeug benötigt, dessen Fahrmodelle in dem Simulationsprogramm vorhanden sind.

In der Simulationsumgebung von IPG CarMaker wird das Fahrzeugmodell des VW Beetle verwendet. Ebenso kommen Modelle für Fahrerassistenzfunktionen zur Anwendung. Idealerweise wird ein bestimmtes logisches Szenario mit mehreren Fahrzeugen durchgeführt, wodurch sich verschiedene Fahrzeuge vergleichen lassen und die jeweiligen Eigenschaften verdeutlichen.

Die logischen Szenarienbeschreibungen können weiter konkretisiert werden. Eine Betrachtung des Fahrverhaltens unter bestimmten Umweltbedingungen erfolgt in dieser Arbeit nicht. Möglicherweise tritt bei eintretenden Eventualitäten ein Fahrverhalten ein, das im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet wurde.

Die Problematik der Bewertung des Fahrverhaltens kann weiter verringert werden. Ein Fahrzeug das beispielsweise komfortabel fährt, fährt nicht automatisch sicher. Eine Ausarbeitung der Beziehungen zwischen den einzelnen Fahreigenschaften und den entsprechenden Kennwerten ist dazu nötig.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Aufbau der Arbeit	2
Abbildung 2.1: Abstraktionsebenen von Szenarien anhand eines Beispielszenarios im Entwicklungsprozess [10, S. 132].....	7
Abbildung 2.2: 5-Ebene-Modell zur Beschreibung von Szenarien [11].....	8
Abbildung 2.3: V-Modell basierter Entwicklungsprozess nach ISO 26262: mit Zuordnung der funktionalen, logischen und konkreten Szenarien [10, S. 134].....	8
Abbildung 2.4: Dekompositionsebenen [15]	10
Abbildung 2.5: Aufbau eines Szenarios durch das 4-Ebenen-Modell [19, S. 115]	11
Abbildung 2.6: Methode zur objektiven Bewertung subjektiven Empfindens [21, S. 49]	12
Abbildung 2.7: Fahrstilbezogene Terminologie und Verbindungen [31, S. 667].....	15
Abbildung 2.8: drei Ebenen der Fahraufgabe und die Zuordnung zur dort wichtigen Handlungsebene [16]	16
Abbildung 2.9: Grenzmuster aus der Korrelation von Längsbeschleunigung und Fahrzeuggeschwindigkeit und der Ausnutzung des Kamm'schen Reibkreises [34, S. 228]	17
Abbildung 2.10: oben: aggressiver Fahrstil, unten: defensiver Fahrstil auf einer vorgegebenen Strecke. defensiv: -3, normal: 0, aggressiv: 3 [36, S. 27]	17
Abbildung 2.11: Akzeptierte Querbesehleunigung unterschiedlicher Fahrertypen [28, S. 1128]	18
Abbildung 2.12: Korrelation zwischen Messdaten und Fahrertyp [37, S. 4]	19
Abbildung 2.13: Bereiche für einen defensiven, normalen und aggressiven Fahrstil für laterale und longitudinale Beschleunigung [30, S. 5]	20
Abbildung 2.14: Grenzwert longitudinale Beschleunigung in der ISO15622 [42]	21
Abbildung 2.15: Grenzwert longitudinale Verzögerung in der ISO15622 [42]	22
Abbildung 2.16: Grenzwerte longitudinaler Ruck in der ISO 15622 [42].....	22
Abbildung 3.1: Kurzmodell zum Vorgehen im dritten Kapitel.....	27
Abbildung 3.2: Vorgehen zur Einteilung der Szenarien in Längs-und Querführung	27
Abbildung 3.3: Einordnung der Szenarien in die Längs- und Querführung	28
Abbildung 3.4: Beschreibung von Situationen durch Parameter und Kennwerte	35
Abbildung 3.5: Szenariobeschreibung - Parameter	43

Abbildung 3.6: Prozessübersicht der Szenarioüberführung [66].....	44
Abbildung 3.7: Aufteilung von OpenDRIVE und OpenSCENARIO auf das 5-Ebenen-Modell nach Bagschik. [67]	45
Abbildung 3.8: Visualisierung des Szenarios durch ein Video in IPG CarMaker	45
Abbildung 3.9: Fahrzeugkoordinatensystem [69].....	46
Abbildung 3.10: Trajektorie des Ego-Fahrzeugs.....	47
Abbildung 3.11: Abweichung von der Fahrstreifenmitte beim Durchfahren einer S-Kurve.....	47
Abbildung 3.12: laterale Beschleunigung des Ego-Fahrzeugs beim Durchfahren der S-Kurve	48
Abbildung 3.13: gleitender Mittelwert über 0,5 s des absoluten lateralen Rucks beim Durchfahren der Links- und der Rechtskurve.....	48
Abbildung 3.14: Durchfahren einer Kurve [21].....	54
Abbildung 3.15: Vorgehensmodell	56
Abbildung 4.1: Trajektorie des Ego-Fahrzeugs mit zugehöriger maximaler linker und rechter Position.....	59
Abbildung 4.2: longitudinale Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs	60
Abbildung 4.3: Abstand zwischen Ego-Fahrzeug und vorausfahrendem Fahrzeug bis zum Verlassen des Fahrstreifens.....	61
Abbildung 4.4: Abstand zwischen Ego-Fahrzeug und vorausfahrendem Verkehrsteilnehmer normiert auf 1	61
Abbildung 4.5: longitudinale Beschleunigung des Ego-Fahrzeugs.....	62
Abbildung 4.6: Farbsystem zur Darstellung des Fahrstils.....	62
Abbildung 4.7: maximale longitudinale Beschleunigung des Ego-Fahrzeugs	63
Abbildung 4.8: maximale longitudinale Verzögerung des Ego-Fahrzeugs	63
Abbildung 4.9: laterale Beschleunigung des Ego-Fahrzeugs	64
Abbildung 4.10: maximale laterale Beschleunigung des Ego-Fahrzeugs beim Fahrstreifenwechsel	65
Abbildung 4.11: Gleichmäßigkeit des Fahrstreifenwechsels nach links normiert auf 1	65
Abbildung 4.12: Gleichmäßigkeit des Fahrstreifenwechsels nach rechts normiert auf 1.....	66
Abbildung 4.13: Farbsystem zur Darstellung des Komfortniveaus	66
Abbildung 4.14: maximale longitudinale Beschleunigung des Ego-Fahrzeugs	67
Abbildung 4.15: maximale longitudinale Verzögerung des Ego-Fahrzeugs	67
Abbildung 4.16: max. gleitender Mittelwert über 1 s des longitudinalen Rucks	68
Abbildung 4.17: maximaler gleitender Mittelwert über 1 s des longitudinalen Rucks der Verzögerung normiert auf 1	68
Abbildung 4.18: gleitender Mittelwert über 0,5 s des lateralen Rucks des Ego-Fahrzeugs.....	69
Abbildung 4.19: maximaler gleitender Mittelwert über 0,5 s des lateralen Rucks bei einem Fahrstreifenwechsel	69

Abbildung 4.20: Anpassung des Szenarios Überholvorgang	70
Abbildung 4.21: weitere Anpassung des Szenarios Überholvorgang.....	71
Abbildung 4.22: Ergebnisse aus dem Szenario μ -split: Sicherheitsrisiko - Kollision und Schleudern tritt ab 90 km/h.....	72
Abbildung 4.23: sinnbildliche Darstellung zur Abweichung des Fahrzeugs von der Fahrstreifenmitte [29].....	73
Abbildung 4.24: Unterschreitung des Sicherheitsabstands zwischen dem Ego-Fahrzeug und dem vorausfahrenden Fahrzeug in Prozent	74
Abbildung 5.1: Krümmung der Fahrbahn einer S-Kurve mit dem Kurvenradius 350 m.....	76

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: SAE Level für autonome Fahrzeuge [3]	3
Tabelle 2.2: Anforderungen an Szenarien im Entwicklungsprozess.....	9
Tabelle 2.3: Kriterien für die Bewertung der aktiven Fahrspurhaltung (LKA) [22, S. 18]	12
Tabelle 2.4: Kriterien für die Bewertung eines automatisierten Fahrstreifenwechsels [22, S. 19]	13
Tabelle 2.5: Kriterien für die Bewertung eines Abstandsregeltempomaten [22, S. 19].....	13
Tabelle 2.6: Einflussfaktoren auf den Fahrstil [31, S. 668]	15
Tabelle 2.7: Bewertungsgrößen für die Fahrerklassifikation nach analysierter Fahrsituation [28, S. 1126]	16
Tabelle 2.8: longitudinale und laterale Beschleunigungen für einen Zug und ein Auto [30, S. 3]	19
Tabelle 2.9: Komfortwerte auf Grundlage der lateralen Beschleunigung [39, S. 5]	20
Tabelle 2.10: Automatisch erkannte ACC-Fahrzustände [22, S. 19]	23
Tabelle 3.1: praktische Führerscheinprüfung - Grundfahraufgaben zum Führung eines Fahrzeugs [46, S. 20]	29
Tabelle 3.2: praktische Führerscheinprüfung - Überholen und Vorbeifahren [46, S. 21].....	29
Tabelle 3.3: praktische Führerscheinprüfung - Fahren innerorts [46, S. 22].....	29
Tabelle 3.4: praktische Führerscheinprüfung - Szenarien, die sich aus den Anforderungen an den Prüfungsort und seine Umgebung ableiten [46, S. 25].....	30
Tabelle 3.5: theoretische Führerscheinprüfung - innerorts [51]	31
Tabelle 3.6: theoretische Prüfung - Verkehrszeichen [51]	31
Tabelle 3.7: theoretische Führerscheinprüfung – Handlungsweise in bestimmten Situationen [51]	32
Tabelle 3.8: Fahrsicherheitstraining – Bremsen und Ausbrechen des Fahrzeugs [52, 53]	32
Tabelle 3.9: Fahrsicherheitstraining – Ausweichen in verschiedenen Situationen [52, 54]	33
Tabelle 3.10: Fahrsicherheitstraining - Kurvenfahrt [53, 55]	33
Tabelle 3.11: Situationen eines ACC-Systems [22]	34
Tabelle 3.12: Fahrmanövergruppen zur objektiven Bewertung des Fahrverhaltens [43]	34
Tabelle 3.13: Situationen für einen automatisierten Fahrzeugführer [44]	35
Tabelle 3.14: Parameter - Straßenlayout.....	36

Tabelle 3.15: Parameter - Verkehrsinfrastruktur.....	37
Tabelle 3.16: Parameter: Bewegliche Objekte.....	37
Tabelle 3.17: Parameter - feste Objekte.....	38
Tabelle 3.18: Kennwerte - Beschleunigung.....	38
Tabelle 3.19: Kennwerte - Abstand.....	39
Tabelle 3.20: Kennwerte - Zeit.....	39
Tabelle 3.21: Kennwerte - Frequenz.....	39
Tabelle 3.22: Kennwerte - Winkel.....	40
Tabelle 3.23: Kennwerte - Geschwindigkeit.....	40
Tabelle 3.24: Beispielhafte Einordnung der funktionalen Szenarien in die Kategorien Sicherheit, Komfort, Fahrstil und Regelkonformität (Anhang E).....	41
Tabelle 3.25: Einordnung der Szenarien zu den Kategorien. Sicherheit enthält die größte Anzahl an Szenarien.....	41
Tabelle 3.26: Szenariobeschreibung des logischen Szenarios „Einfädeln in den fließenden Verkehr bei einer Autobahnauffahrt“.....	41
Tabelle 3.27: Testobjekt des logischen Szenarios „Einfädeln in den fließenden Verkehr bei einer Autobahnauffahrt“.....	42
Tabelle 3.28: Abbildung des logischen Szenarios „Einfädeln in den fließenden Verkehr bei einer Autobahnauffahrt“.....	42
Tabelle 3.29: Beobachtung/Ziel des logischen Szenarios „Einfädeln in den fließenden Verkehr bei einer Autobahnauffahrt“.....	42
Tabelle 3.30: Parameter des logischen Szenarios „Einfädeln in den fließenden Verkehr bei einer Autobahnauffahrt“.....	43
Tabelle 3.31: Parameter Variationen des logischen Szenarios „Einfädeln in den fließenden Verkehr bei einer Autobahnauffahrt“.....	43
Tabelle 3.32: Output und daraus berechenbare Kennwerte des logischen Szenarios „Einfädeln in den fließenden Verkehr bei einer Autobahnauffahrt“.....	44
Tabelle 3.33: VW Beetle Fahrzeugdaten.....	46
Tabelle 3.34: Zuordnung von objektiven Kennwerten zu den Fähigkeiten des Systems bei dem funktionalen Szenario "Durchfahren einer S-Kurve".....	49
Tabelle 3.35: Fahrstil: longitudinale Verzögerung.....	51
Tabelle 3.36: Fahrstil: longitudinale Beschleunigung.....	52
Tabelle 3.37: Fahrstil - laterale Beschleunigung.....	53
Tabelle 4.1: Szenariobeschreibung Überholvorgang.....	57
Tabelle A.6.1: Führerscheinrichtlinie - Szenarien praktische Prüfung.....	xvii
Tabelle A.6.2: Führerscheinrichtlinie - Szenarien theoretische Prüfung.....	xviii
Tabelle A.6.3: Fahrsicherheitstraining.....	xix

Tabelle A.6.4: Literatur.....xx

Tabelle B.1: Straßenlayout xxii

Tabelle B.2: Verkehrsinfrastruktur xxiii

Tabelle B.3: Bewegliche Objekte xxiii

Tabelle B.4: Feste Objekte xxiv

Tabelle C.1: Beschleunigung xxvi

Tabelle C.2: Abstand xxvi

Tabelle C.3: Zeit xxvii

Tabelle C.4: Frequenz xxvii

Tabelle C.5: Winkel..... xxvii

Tabelle C.6: Geschwindigkeit xxvii

Tabelle D.1: Grenzwerte xxviii

Tabelle E1: Einteilung der Szenarien in die Kategorien Sicherheit, Regelkonformität, Fahrstil und Fahrkomfortxxx

Tabelle F.1: Stopp &Go xxxv

Tabelle F.2: μ -split xxxv

Tabelle F.3: S-Kurve xxxvi

Tabelle F.4: Überholvorgang xxxvi

Literaturverzeichnis

- [1] VIS Bayern, *Fahrerassistenzsysteme machen das fahren sicherer, entspannter und umweltfreundlicher*. [Online] Verfügbar: https://www.vis.bayern.de/produktsicherheit/produktgruppen/kraftfahrzeuge/fahrerassistenzsysteme_sicherheit_kfz.htm. Gefunden am: Mai. 01 2019.
- [2] F. Schuldt, B. Lichte, M. Maurer, und S. Scholz, "Systematische Auswertung von Testfällen für Fahrfunktionen im modularen virtuellen Testbaukasten,"
- [3] SAE International, *SAE International*. [Online] Verfügbar: www.sae.org/about. Gefunden am: Feb. 20 2019.
- [4] Audi AG, *Audi A8 - Audi AI Staupilot*. [Online] Verfügbar: <https://www.audi-technology-portal.de/de/elektrik-elektronik/fahrerassistenzsysteme/audi-a8-audi-ai-staupilot>. Gefunden am: Feb. 20 2019.
- [5] U.S. department of transportation, "NHTSA Federal Automated Vehicles Policy," Sep. 2016.
- [6] U.S. department of transportation, "Automated Driving Systems: A Vision for Safety," Sep. 2017.
- [7] Euro NCAP, "Euro NCAP 2025 Roadmap: In pursuit of vision zero,"
- [8] W. Wachenfeld *et al*, "Autonomes Fahren: Use-Cases des autonomen Fahrens," in *Autonomes Fahren: Sicherheitspotenzial automatisierter Fahrzeuge Erkenntnisse aus der Unfallforschung*, M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz, und H. Winner, Hrsg, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 9–37.
- [9] Ulbrich S, Menzel T, Reschka A, Schuldt F, Maurer M, "Definition der Begriffe Szene, Situation und Szenario für das autonome Fahren", 2015
- [10] Bagschik, G, Menzel, T, Reschka, A, Schuldt, F, Maurer, M, "Szenarien für Entwicklung, Absicherung und Test von automatisierten Fahrzeugen," *11. Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren*, S. 125–135, 2017.
- [11] Pegasusprojekt, *Szenarienbeschreibung: Szenarien sind nicht gleich Szenarien*. [Online] Verfügbar: www.pegasusprojekt.de. Gefunden am: Jan. 08 2019.
- [12] G. Bagschik, A. Reschka, T. Stolte, und Maurer M, "Identification of potential hazardous events for an Unmanned Protective Vehicle," IEEE Intelligent Vehicles Symposium (VI), 2016.
- [13] F. Fahrenkrog, "Wirksamkeitsanalyse von Fahrerassistenzsystemen in Bezug auf die Verkehrssicherheit," Dissertation, Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen, RWTH Aachen, Aachen, 2016.

- [14] RESPONSE Consortium, "Code of practice for the design and evaluation of ADAS," Aug. 2009.
- [15] C. Amersbach und H. Winner, "Functional Decomposition: An Approach to Reduce the Approval Effort for Highly Automated Driving," Institute of Automotive Engineering Technische Universität Darmstadt., München, 2017
- [16] M. Vollrath, S. Briest, und C. Schießl, *Ableitung von Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme aus Sicht der Verkehrssicherheit*. Bremerhaven: Verlag für neue Wissenschaft GmbH, 2006.
- [17] H. Nagel, W. Enkelmann, und Struck G, "FhG-Co-Driver: From Map-Guided Automatic Driving by Machine Vision to a Cooperative Driver Support," *Mathl. Comput. Modelling*, 1995.
- [18] *GIDAS German In-Depth Accident Study*. [Online] Verfügbar: <https://www.gidas.org/willkommen/>. Gefunden am: Mrz. 12 2019.
- [19] F. Schuldt, "Ein Beitrag für den methodischen Test von automatisierten Fahrfunktionen mit Hilfe von virtuellen Umgebungen," Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik, Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig, 2016.
- [20] W. Tölle, "Ein Fahrmanöverkonzept für einen maschinellen Kopiloten," Düsseldorf, VDI-Verlag, 1996
- [21] Dr. J. Holzinger, Dr. P. Schöggel, Dr. M. Schrauf, E. Bogner, "Objektivierung der Fahrbarkeit automatisierter Fahrzeuge," *ATZ*, Bd. 116. Jahrgang, S. 45–53, Dez. 2014.
- [22] Dr. J. Holzinger, E. Bogner, "Objektivierte Bewertung von Fahrerassistenzsystemen," *ATZ*, Bd. 119. Jahrgang, S. 16–20, Sep. 2017.
- [23] S. Arndt, "Evaluierung der Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen: Modell zum Kaufverhalten von Endkunden," Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 2011.
- [24] M. Festner, A. Eicher, und D. Schramm, "Beeinflussung der Komfort- und Sicherheitswahrnehmung beim hochautomatisierten Fahren durch fahrfremde Tätigkeiten und Spurwecheldynamik," 11. Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren, 2017
- [25] T. Müller, *Ermittlung vestibulärer Wahrnehmungsschwellen zur zielgerichteten Gestaltung der Fahrzeug-Längsdynamik*. [Online] Verfügbar: <https://mediatum.ub.tum.de/?id=1253476>. Gefunden am: Mrz. 25 2019.
- [26] H. Bellem, "Comfort in Automated Driving: Analysis of Driving Style Preference in Automated Driving," Dissertation, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, 2018.
- [27] B. Abendroth und R. Bruder, Hrsg, *Die Leistungsfähigkeit des Menschen für die Fahrzeugführung*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009.
- [28] A. Schulz und R. Fröming, "Analyse des Fahrverhaltens zur Darstellung adaptiver Eingriffsstrategien von Assistenzsystemen," *ATZ*, Bd. 110, Rn. 12, S. 1124–1131, 2008.
- [29] G. Büyükyıldız *et al*, "Identification of the driving style for the adaptation of assistance systems," *Int. J. Vehicle Autonomous Systems*, Rn. Vol. 13, No. 3, S. 244–260, 2017.

-
- [30] J. Karjanto, N. Yusof, J.M.B. Terken, F.L.M. Delbressine, M.Z.B. Hassan, Rauterberg, G. W. M, "Simulating autonomous driving styles: accelerations for three road profiles," Eindhoven University of Technology, 2017.
- [31] M. Martinez, M. Heucke, F. Wang, B. Gao, und D. Cao, "Driving Style Recognition for Intelligent Vehicle Control and Advanced Driver Assistance: A Survey," No. 3, Mrz. 2018.
- [32] H. Winner, W. Wachenfeld, und P. Junietz, "(How) Can Safety of Automated Driving be Validated?," in *Virtual Vehicle Symposium Graz 2016*
- [33] O. Pion, R. Henze, und F. Küçükay, "Fingerprint des Fahrers zur Adaption von Assistenzsystemen," Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig.
- [34] J. Bossdorf-Zimmer, H. Kollmer, R. Henze, und F. Küçükay, "Fingerprint des Fahrers zur Adaption von Assistenzsystemen," *ATZ*, Bd. 113, Rn. 03, S. 226–231, 2011.
- [35] M. Elbanhawi, R. Simic, und R. Jazar, "In the Passenger Seat: Investigating Ride Comfort Measures in Autonomous Cars," in *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, S. 4–17.
- [36] W. Han, W. Wang, X. Li, und Xi J, "Statistical-based approach for driving style recognition using Bayesian probability with kernel density estimation," in *IET Intelligent Transport Systems*, S. 22–30.
- [37] C. Mayser, Lippold C, D. Eberbach, und M. Dietze, "Fahrerassistenzsysteme zur Unterstützung der Längsregelung im ungebundenen Verkehr,"
- [38] W. Hugemann und M. Nickel, "Longitudinal and Lateral Accelerations in Normal Day Driving," Leverkusen.
- [39] J. Xu, K. Yang, Y. Shao, und G. Lu, "An Experimental Study on Lateral Acceleration of Cars in Different Environments in Sichuan, Southwest China," *Discrete Dynamics in Nature and Society*, Rn. 2015.
- [40] S. Griesche, E. Nicolay, D. Assmann, M. Dotzauer, und D. Käthner, "Soll mein Auto so fahren wie ich? – Welchen Fahrstil präferieren Fahrer für die Auslegung automatisierter Fahrzeugfunktionen?," DLR, Braunschweig.
- [41] *UNECE, R79 Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to steering equipment*, Add. 78, 2018.
- [42] *ISO 15622:2018 Intelligent transport systems — Adaptive cruise control systems — Performance requirements and test procedures*, 2018.
- [43] M. Ersoy, S. Gies, B. Heißing, und C. Schimmel, *Fahrwerkhandbuch: Grundlagen - Fahrdynamik - Fahrverhalten- Komponenten - Elektronische Systeme - Fahrerassistenz - Autonomes Fahren- Perspektiven*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- [44] H. Nagel, "A Vision of 'Vision and Language' Comprises Action: An Example from Road Traffic," *Artificial Intelligence Review* 8, 1994.
- [45] J. Mazzega, "Wie PEGASUS die Lücke im Bereich Testen und Freigabe von automatisierten Fahrzeugen schließt," Gefunden am: Nov. 30 2018.
- [46] *Prüfungsrichtlinie für die Prüfung der Bewerber um eine Erlaubnis zum Führen von Kraftfahrzeugen: Prüfungsrichtlinie*, 2012.

- [47] stvo.de, *stvo.de das Portal zur Straßenverkehrsordnung: Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen*. [Online] Verfügbar: <https://www.stvo.de/strassenverkehrsordnung/123-45-verkehrszeichen-und-verkehrseinrichtungen>. Gefunden am: Feb. 20 2019.
- [48] ADAC, *Pkw Intensiv-Training: Trainingsinhalte*. [Online] Verfügbar: <https://www.adac.de/produkte/fahrsicherheitstraining/default.aspx?ModalPagelId=203243&ComponentId=203235&SourcePagelId=0&sum=true>. Gefunden am: Dez. 05 2018.
- [49] Youtube, *Blick hinter die Kulissen: ADAC Fahrsicherheitstraining*. [Online] Verfügbar: <https://www.youtube.com/watch?v=cyhxFMcJWKs>. Gefunden am: Dez. 08 2018.
- [50] Youtube, *Härtetest für Mensch und Maschine - Fahrsicherheitstraining*. [Online] Verfügbar: <https://www.youtube.com/watch?v=JLmtM9KMc58>. Gefunden am: Dez. 09 2018.
- [51] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, *Prüfungsfragen theoretische Führerscheinprüfung*. [Online] Verfügbar: <https://autorensystem.tuev-dekra.de/autorensystem/task/taskList>. Gefunden am: Apr. 10 2019.
- [52] Youtube, *ADAC-Fahrsicherheitstraining (Perfektionstraining)*. [Online] Verfügbar: <https://www.youtube.com/watch?v=fVauRBR6qH8>. Gefunden am: Dez. 10 2018.
- [53] Youtube, *Follow me around ADAC Junge Fahrer-Training*. [Online] Verfügbar: <https://www.youtube.com/watch?v=PC-U64wiCGA>. Gefunden am: Dez. 08 2018.
- [54] Youtube, *Fahrsicherheitstraining - BMW Driving Academy Maisach*. [Online] Verfügbar: <https://www.youtube.com/watch?v=BTXejp2bht0>. Gefunden am: Dez. 10 2018.
- [55] Youtube, *ADA Fahrsicherheitstraining Grevenbroich*. [Online] Verfügbar: <https://www.youtube.com/watch?v=IDz7AiiapH0>. Gefunden am: Dez. 07 2018.
- [56] *Straßenverkehrs-Ordnung: StVO*, 2013.
- [57] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., *Richtlinien für die Anlage von Autobahnen: RAA*, 2008th Aufl.: FGSV Verlag GmbH.
- [58] D. Zierke, "Sichere Gestaltung von Landstraßen durch definierte Straßentypen," Dissertation, Verkehrs- und Maschinensysteme, Technische Universität Berlin, Berlin, 2010.
- [59] *UNECE, R130 Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles with regard to the Lane Departure Warning System, Add. 129, 2013 (LDWS)*, 129, 2013.
- [60] Deutscher Verkehrssicherheitsrat, *Verkehrszeichen in der StVO: Abschnitt 7 Geschwindigkeitsbeschränkungen und Überholverbote*. [Online] Verfügbar: <https://www.dvr.de/publikationen/downloads/verkehrszeichen.html>. Gefunden am: Apr. 05 2019.
- [61] H. List, P. Schoeggel, und G. Fraidl, "Objektive Beurteilung des subjektiven Fahrempfindens," *ATZ Automobiltech Z*, Rn. 100, S. 274, 1998.
- [62] *Intelligent transport systems — Adaptive cruise control systems — Performance requirements and test procedures*, 15622, 2018.
- [63] Youtube, *ADAC Fahrsicherheitstraining - Intensiv Training*. [Online] Verfügbar: <https://www.youtube.com/watch?v=AdNPHWtkJNo>. Gefunden am: Dez. 10 2018.

- [64] OpenDRIVE, *OpenDRIVE: managing the road ahead*. [Online] Verfügbar: <http://www.opendrive.org>. Gefunden am: Apr. 05 2019.
- [65] OpenSCENARIO, *OpenSCENARIO: bringing content to the road*. [Online] Verfügbar: <http://openscenario.org>. Gefunden am: Apr. 05 2019.
- [66] T. Menzel, G. Bagschik, L. Isensee, A. Schomburg, und M. Maurer, "Detaillierung einer stichwortbasierten Szenariobeschreibung für die Durchführung in der Simulation am Beispiel von Szenarien auf deutschen Autobahnen," 2018
- [67] G. Bagschik, T. Menzel, und M. Maurer, "Ontology based Scene Creation for the Development of Automated Vehicles," 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV).
- [68] IPG Automotive, *CarMaker: Pkw und leichte Nutzfahrzeuge virtuell testen*. [Online] Verfügbar: <https://ipg-automotive.com/de/produkte-services/simulation-software/carmaker/>. Gefunden am: Apr. 08 2019.
- [69] Github, *RotationMatrix*. [Online] Verfügbar: <https://github.com/balzer82/RotationMatrix>. Gefunden am: Apr. 12 2019.
- [70] BGH, *VRS 34,89 = DAR 68,50*.
- [71] BGH, *VRS 10,252*.
- [72] OLG Karlsruhe, *VersR2002, 1434*.
- [73] D. Dörr, D. Grabengieser, und F. Gauterin, "Online Driving Style Recognition using Fuzzy Logic," 2014 IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Qingdao, China, Okt. 2004.
- [74] C. Schmidt, "Hardware-in-the-Loop gestützte Entwicklungsplattform für Fahrerassistenzsysteme: Analyse und Generierung kritischer Verkehrsszenarien," Dissertation, Universität Kassel, Kassel, 2010.

Anhang

Anhang A	Funktionale Szenarien.....	xvii
Anhang B	Parameter.....	xxii
Anhang C	Kennwerte	xxv
Anhang D	Grenzwerte.....	xxvii
Anhang E	Einteilung der Szenarien in die Kategorien Sicherheit, Regelkonformität, Fahrstil und Fahrkomfort	xxix
Anhang F	Schwachstellen und Anpassungen	xxxv

Anhang A Funktionale Szenarien

Tabelle A.6.1: Führerscheinrichtlinie - Szenarien praktische Prüfung

Szenario	Umgebung	primäre Fahrzeugführung	Einordnung
Erkennen von Verkehrszeichen und -einrichtungen	allgemein	Längsführung	null
Steigung und Gefällestrecken	allgemein	Längsführung	null
Fahrgeschwindigkeit an Verkehrslage anpassen	allgemein	Längsführung	null
Abstand halten vom vorausfahrenden Fahrzeug	allgemein	Längsführung	konstant
Vorausschauendes Fahren	allgemein	Längsführung	null
Überholen	Autobahn	Querführung	konstant
Überholtwerden	Autobahn	Längsführung	null
Vorbeifahren	Stadt	Längsführung	null
Verhalten an Kreuzungen, Einmündungen, Kreisverkehren und Bahnübergängen	Stadt	Längsführung	transient
Abbiegen	Stadt	Querführung	konstant
Verhalten gegenüber Fußgängern	Stadt	Längsführung	konstant
Verhalten an Haltestellen öffentlicher Verkehrsmittel	Stadt	Längsführung	null
Richtige Fahrbahnbenutzung	allgemein	Längsführung	null
Anfahren in fließenden Verkehr vom Fahrbahnrand aus	Stadt	Längsführung	transient
Einfahren in Vorfahrtsstraßen	Stadt	Querführung	konstant

Befahren von Kreuzungen mit Stoppschild	Stadt	Längsführung	konstant
Befahren von Kreuzungen mit Lichtzeichen	Stadt	Längsführung	konstant
Linksabbiegen auf Fahrbahnen mit Gegenverkehr	Stadt	Querführung	transient
Regelkonformer Fahrstreifenwechsel	Autobahn	Querführung	konstant
Befahren von Kreuzungen mit abknickender Vorfahrt	Stadt	Querführung	konstant
Rechts-/Links-Abbiegen unter besonderer Berücksichtigung von Radfahrern auf Radwegen oder Seitenstreifen	Stadt	Querführung	transient

Tabelle A.6.2: Führerscheinrichtlinie - Szenarien theoretische Prüfung

Szenario	Umgebung	primäre Fahrzeugführung	Einordnung
Fußgänger/Radfahrer von links/rechts überquert Fahrbahn	Stadt	Längsführung	konstant
Fußgänger/Radfahrer überquert Fußgängerüberweg trotz roter Ampel	Stadt	Längsführung	konstant
Radfahrer schert vor dem Fahrzeug ein	Stadt	Längsführung	konstant
Objekt befindet sich auf der Fahrbahn	Stadt	Längsführung	konstant
Fußgänger/Radfahrer erscheint hinter parkendem Auto	Stadt	Längsführung	konstant
Verhalten gegenüber Radfahrern	Stadt	Querführung	konstant
Haltestelle von öffentlichen Verkehrsmitteln passieren	Stadt	Längsführung	null

Verkehrszeichen zum Leiten des Verkehrs	Stadt	Längsführung	null
Regelung des Verkehrs mit und ohne Verkehrszeichen	Stadt	Längsführung	null
Durchfahren einer temporär veränderten Verkehrsführung	Stadt	Längsführung	konstant
Verhalten an Ampeln, Bahnübergängen, Schranken	Stadt	Längsführung	konstant
Sonstige Verkehrszeichen	Stadt	Längsführung	null
Fahrzeug überholt trotz Abbiegevorgang	allgemein	Längsführung	transient
Vorausfahrendes Fahrzeug schert durch (Cut through)	Autobahn	Längsführung	konstant
Vorausfahrendes Fahrzeug schert ein (Cut in)	Autobahn	Längsführung	konstant
Vorausfahrender Radfahrer schert ein	Stadt	Längsführung	konstant
Fahrzeug schert auf Landstraße ein	Landstraße	Längsführung	konstant
Wild	Landstraße	Längsführung	konstant
Sicht ist durch Nebel/Regen beeinträchtigt	Landstraße	Längsführung	null
Schneebedeckte Fahrbahn	allgemein	Längsführung	null

Tabelle A.6.3: Fahrsicherheitstraining

Szenario	Umgebung	primäre Fahrzeugführung	Einordnung
Bremsen auf μ -split	allgemein	Längsführung	transient
Bremsen mit maximaler Verzögerung bergab	allgemein	Längsführung	konstant
Bremsen auf μ -low	allgemein	Längsführung	transient
Bremsen in Kurve	allgemein	Querführung	transient

Ausbrechen auf Gerade	allgemein	Querführung	transient
Ausbrechen in Kurve	allgemein	Querführung	transient
Ausweichen auf μ -split	allgemein	Querführung	transient
Ausweichen auf μ -low	allgemein	Querführung	transient
Ausweichen mit Bremsen	allgemein	Querführung	konstant
Ausweichen von festen Hindernissen	allgemein	Querführung	transient
Ausweichen von plötzlich auftretenden Hindernissen	allgemein	Querführung	transient
Enger werdender Kurvenverlauf	allgemein	Querführung	transient
Slalomfahrt	allgemein	Querführung	transient
Wechselnder Kurvenverlauf	allgemein	Querführung	konstant
Ausbrechen des Fahrzeugs in einer Kurve	allgemein	Querführung	transient

Tabelle A.6.4: Literatur

Szenario	Umgebung	primäre Fahrzeugführung	Einordnung
Folgefahrt konstant	allgemein	Längsführung	null
Beschleunigung bei Folgefahrt	allgemein	Längsführung	konstant
Verzögerung bei Folgefahrt	allgemein	Längsführung	konstant
Anhalten bei Folgefahrt	allgemein	Längsführung	konstant
Anfahren bei Folgefahrt	allgemein	Längsführung	konstant
Einscheren bei Folgefahrt	allgemein	Längsführung	konstant
Ausscheren bei Folgefahrt	allgemein	Längsführung	konstant
Auffahren auf langsames Fahrzeug	allgemein	Längsführung	konstant
Kreisfahrt	allgemein	Querführung	konstant

Wechsellenken	allgemein	Querführung	periodisch
Geradeausfahrt	allgemein	Längsführung	null
Lenkwinkelsprung	allgemein	Querführung	transient
Auf- und Abfahren von der Autobahn	Autobahn	Längsführung	konstant
Passieren von Auf- & Abfahrten	Autobahn	Längsführung	null
Ausweichen eines Hindernisses ohne Verlassen des Fahrstreifens	allgemein	Querführung	transient
Einer Straße folgen	allgemein	Längsführung	null
Fahrstreifenwechsel links/rechts	Autobahn	Querführung	konstant
Auf dem Seitenstreifen halten	Autobahn	Längsführung	konstant
Vom Seitenstreifen anfahren	Autobahn	Längsführung	konstant
Vor einem Hindernis halten	allgemein	Längsführung	konstant
Auf Abbiegestreifen fahren	Stadt	Längsführung	konstant

Anhang B Parameter

Tabelle B.1: Straßenlayout

Parameter	Einheit	Parameterbereiche
Straßenart [56]	-	Autobahn; Bundes-; Staats-; Kreis-; Landstraße; innerorts; verkehrsberuhigter Bereich
Fahrstreifenanzahl [57]	-	1; 2; 3; 4; 5; 6
Fahrstreifenbreite [58, S. 18]	m	3,00 m; 3,25 m; 3,50 m; 3,75 m
Kurvenradius [58]	m	280 m; 350 m; >350 m
Längsneigung [58, S. 38]	deg	± 0 – 8,0 %
Querneigung [58, S. 9]	deg	± 2,5 – 6,0 %
Markierung [59]	cm	Breite
Fahrstreifenmarkierung [59]	-	Standard; temporär; durchgezogen; gestrichelt
Gehweg [46]	-	ja; nein
Parkplatz [46]	-	ja; nein
Haltstelle öffentliche Verkehrsmittel [46]	-	ja; nein
Kreisverkehr [51]	-	ja; nein
Kreuzung [46]	-	rechts vor links; mit Ampel; mit Verkehrsschild
Fußgängerüberweg [51]	-	mit Ampel; Zebrastreifen; ohne/mit Insel
Wendehammer [46]	-	ja; nein

Tabelle B.2: Verkehrsinfrastruktur

Parameter	Einheit	Parameterbereiche
Mindestgeschwindigkeit	-	abhängig von der Straßenart; StVO Zeichen 525-31 [60]
Verkehrszeichen [56]	-	StVO-Zeichen
Höchstgeschwindigkeit [56]	-	abhängig von der Straßenart bzw. von Verkehrszeichen
Überholverbot [56]	-	Fahrzeugbeschränkung; Richtungsbeschränkung
Beschränkte Fahrzeugabmessungen [56]	-	StVO Zeichen 264, 265, 266 [60]

Tabelle B.3: Bewegliche Objekte

Parameter	Einheit	Parameterbereiche
Typ [46]	-	Hindernis; Fußgänger, Fahrradfahrer, Motorrad; LKW; PKW, Tier; Fzg. mit Sonderrechten
Abmessungen	m	-
Masse	kg	-
Geschwindigkeit longitudinal [56]	km/h	-
Geschwindigkeit lateral [61]	m/s	-
Entfernung zu anderen Objekten[56]	m	-
Dauer des Manövers	s	-
Beschleunigung longitudinal [42]	m/s ²	-
Beschleunigung lateral [41]	m/s ²	-
Trajektorie	m	zeitgesteuert; entfernungssteuert, eventgesteuert
Kurswinkel	-	relative Geschwindigkeit; relative Entfernung

Tabelle B.4: feste Objekte

Parameter	Einheit	Parameterbereiche
Typ	-	bekannt; unbekannt
Position	m	-
Abmessungen [46]	m	-

Anhang C Kennwerte

Tabelle C.1: Beschleunigung

Kennwerte	Einheit	Charakterisierung
Max. longitudinale Verzögerung [62]	m/s ²	Längsführung
Max. longitudinale Beschleunigung [62]	m/s ²	Längsführung
Max. laterale Beschleunigung [22]	m/s ²	Querführung
Max. lateraler Ruck [22]	m/s ³	Querführung
Max. longitudinaler Ruck [22]	m/s ³	Längsführung
Max. gleitender Mittelwert Beschleunigung über 2 s [42]	m/s ²	Längsführung
Max. gleitender Mittelwert Verzögerung über 2 s [42]	m/s ²	Längsführung
Max. gleitender Mittelwert longitudinaler Ruck über 1 s [62]	m/s ³	Längsführung
Max. gleitender Mittelwert lateraler Ruck über 0,5 s [41]	m/s ³	Längsführung
Gleichmäßigkeit des Fahrstreifenwechsels [22]	m/s ²	Querführung

Tabelle C.2: Abstand

Kennwerte	Einheit	Charakterisierung
Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug [56]	m	Längsführung
Abstand zur rechten Begrenzungslinie [46]	m	Querführung
Abstand zur linken Begrenzungslinie [46]	m	Querführung
Abstand von der Fahrstreifenmittellinie	m	Querführung

Spurversatz in neuer Fahrspur nach Spurwechsel [22]	m	Querführung
---	---	-------------

Nutzungsgrad der vorhandenen Fahrspurbreite [22]	%	Querführung
--	---	-------------

Tabelle C.3: Zeit

Kennwerte	Einheit	Charakterisierung
Zeitlücke	s	Längsführung
Reaktionszeit	s	Längsführung
TTC	s	Längsführung

Tabelle C.4: Frequenz

Kennwerte	Einheit	Charakterisierung
Pendeln: um Fahrstreifenmitte	Hz	Querführung
Pendeln: Anfahren & Abbremsen	Hz	Längsführung

Tabelle C.5: Winkel

Kennwerte	Einheit	Charakterisierung
Abweichung Lenkwinkel [63]	deg	Querführung
Gierwinkel	deg	Querführung
Gierrate	deg/s	Querführung

Tabelle C.6: Geschwindigkeit

Kennwerte	Einheit	Charakterisierung
Max. longitudinale Geschwindigkeit bei zugehöriger Geschwindigkeitsbegrenzung [56]	m/s	Längsführung
Max. laterale Geschwindigkeit [21]	m/s	Querführung

Anhang D Grenzwerte

Tabelle D.1: Grenzwerte

Kennwert	Grenzwert
Laterale Beschleunigung	3,0 m/s ²
Lateraler Ruck	5 m/s ³
Longitudinale Beschleunigung	2,0 – 4,0 m/s ²
Longitudinale Verzögerung	3,5 – 5,0 m/s ²
Longitudinaler Ruck	2,5 – 5,0 m/s ³
Min. Abstand Seitenbegrenzungslinien	0 m
Min. Abstand zu vorausfahrendem Fahrzeug	$v/2$
Min. Abstand zu dahinterfahrendem Fahrzeug beim Einscheren	$v_{TSV}/2$
Min. Abstand bei Vorbeifahrt anders Fahrzeug	1 m
Min. Abstand bei Vorbeifahrt Radfahrer	1,5 m
Fahrfreifennutzungsgrad	100 %
Max. Position nach links	Positive Fahrfreifensbreite
Max. Position nach rechts	Negative Fahrfreifensbreite
Abweichung von Fahrfreifensmitte	Fahrfreifensbreite/2

Anhang E Einteilung der Szenarien in die Kategorien Sicherheit, Regelkonformität, Fahrstil und Fahrkomfort

Tabelle E.1: Einteilung der Szenarien in die Kategorien Sicherheit, Regelkonformität, Fahrstil und Fahrkomfort

Szenario	Sicherheit	Regelkonformität	Fahrstil	Fahrkomfort
Erkennen von Verkehrszeichen und -einrichtungen	x	x		
Steigung und Gefällestrecken			x	x
Fahrgeschwindigkeit an Verkehrslage anpassen	x	x	x	
Abstand halten vom vorausfahrenden Fahrzeug	x	x		
Vorausschauendes Fahren			x	x
Überholen	x	x	x	x
Überholtwerden		x		
Vorbeifahren	x	x		
Verhalten an Kreuzungen, Einmündungen, Kreisverkehren und Bahnübergängen	x	x	x	x
Abbiegen	x	x	x	x
Verhalten gegenüber Fußgängern	x		x	
Verhalten an Haltestellen öffentlicher Verkehrsmittel	x	x	x	
Richtige Fahrbahnbenutzung		x		

Anhang E Einteilung der Szenarien in die Kategorien Sicherheit, Regelkonformität, Fahrstil und Fahrkomfort

Anfahren in fließenden Verkehr vom Fahrbahnrand aus	x	x		
Einfahren in Vorfahrtsstraßen	x	x		
Befahren von Kreuzungen mit Stoppschild		x	x	x
Befahren von Kreuzungen mit Lichtzeichen		x	x	x
Linksabbiegen auf Fahrbahnen mit Gegenverkehr	x	x	x	x
Regelkonformer Fahrstreifenwechsel	x	x		
Befahren von Kreuzungen mit abknickender Vorfahrt		x	x	x
Rechts-/Links-Abbiegen unter besonderer Berücksichtigung von Radfahrern auf Radwegen oder Seitenstreifen	x	x		
Fußgänger/Radfahrer von links/rechts überquert Fahrbahn	x			
Fußgänger/Radfahrer überquert Fußgängerüberweg trotz roter Ampel	x			
Radfahrer schert vor dem Fahrzeug ein	x	x		
Objekt befindet sich auf der Fahrbahn	x			
Fußgänger/Radfahrer erscheint hinter parkendem Auto	x			
Verhalten gegenüber Radfahrern	x	x	x	x
Haltestelle von öffentlichen Verkehrsmitteln passieren	x	x		

Anhang E Einteilung der Szenarien in die Kategorien Sicherheit, Regelkonformität, Fahrstil und Fahrkomfort

Verkehrszeichen zum Leiten des Verkehrs		x		
Regelung des Verkehrs mit und ohne Verkehrszeichen		x		
Durchfahren einer temporär veränderten Verkehrsführung	x	x	x	x
Verhalten an Ampeln, Bahnübergängen, Schranken		x		
Sonstige Verkehrszeichen	x	x	x	x
Fahrzeug überholt trotz Abbiegevorgang	x			
Vorausfahrendes Fahrzeug schert durch (Cut through)	x	x	x	x
Vorausfahrendes Fahrzeug schert ein (Cut in)	x	x	x	x
Vorausfahrender Radfahrer schert ein	x	x		
Fahrzeug schert auf Landstraße ein	x			
Wild	x			
Sicht ist durch Nebel/Regen beeinträchtigt	x		x	x
Schneebedeckte Fahrbahn	x			
Bremsen auf μ -split	x			
Bremsen mit maximaler Verzögerung bergab	x			
Bremsen auf μ -low	x			
Bremsen in Kurve	x		x	x
Ausbrechen auf Gerade	x			
Ausbrechen in Kurve	x			

Anhang E Einteilung der Szenarien in die Kategorien Sicherheit, Regelkonformität, Fahrstil und Fahrkomfort

Ausweichen auf μ -split	x			
Ausweichen auf μ -low	x			
Ausweichen mit Bremsen	x			
Ausweichen von festen Hindernissen	x			
Ausweichen von plötzlich auftretenden Hindernissen	x			
Enger werdender Kurvenverlauf	x	x	x	x
Slalomfahrt	x		x	x
Wechselnder Kurvenverlauf	x		x	x
Ausbrechen des Fahrzeugs in einer Kurve	x			
Folgefahrt konstant	x	x	x	
Beschleunigung bei Folgefahrt	x	x	x	x
Verzögerung bei Folgefahrt	x	x	x	x
Anhalten bei Folgefahrt	x	x	x	x
Anfahren bei Folgefahrt	x	x	x	x
Einscheren bei Folgefahrt	x	x	x	x
Ausscheren bei Folgefahrt	x	x	x	x
Auffahren auf langsames Fahrzeug	x	x	x	x
Kreisfahrt	x		x	x
Wechsellenken	x		x	x
Geradeausfahrt	x	x	x	x
Lenkwinkelsprung	x		x	x
Auf- und Abfahren von der Autobahn	x	x	x	x

Anhang E Einteilung der Szenarien in die Kategorien Sicherheit, Regelkonformität, Fahrstil und Fahrkomfort

Passieren von Auf- & Abfahrten	x		x	x
Ausweichen eines Hindernisses ohne Verlassen des Fahrstreifens	x		x	x
Einer Straße folgen	x	x	x	x
Fahrstreifenwechsel links/rechts	x	x	x	x
Auf dem Seitenstreifen halten	x	x	x	x
Vom Seitenstreifen anfahren	x	x	x	x
Vor einem Hindernis halten	x	x	x	x
Auf Abbiegestreifen fahren	x	x	x	x

Anhang F Schwachstellen und Anpassungen

Tabelle F.1: Schwachstellen Stopp & Go

Schwachstelle	Anpassung des Szenarios
Unterschreitung Sicherheitsabstand	Vorausfahrendes Fahrzeug bremst mit -3, -5, -7 m/s ²
Ungleichmäßiges Beschleunigungsverhalten	Änderung der Frequenz des vorausfahrenden Fahrzeugs
Abstand zwischen den beiden Fahrzeugen wird im Verlauf immer größer	Vorausfahrendes Fahrzeug

Tabelle F.2: Schwachstellen μ -split

Schwachstelle	Anpassung
Ausbrechen des Fahrzeugs	Reibwert Straße μ , = 0,1 bis 0,8
Schleudern des Fahrzeugs	Reibwert Straße μ , = 0,1 bis 0,8
Verlassen der Fahrbahn	Reibwert Straße μ , = 0,1 bis 0,8
Crash mit Hindernis	
Crash trotz frühzeitigem Erkennen des Hindernisses	Hindernis erscheint plötzlich im Abstand 25 m, 50 m, 75 m, 100 m
Fahrzeug weicht mit sehr großem Abstand aus	Entgegenkommendes Fahrzeug

Tabelle F.3: Schwachstellen S-Kurve

Schwachstelle	Anpassung
Ausweichen nach außen am Kurveneingang	Hindernis außen am Kurveneingang
Ausweichen nach außen am Kurvenausgang	Hindernis außen am Kurvenausgang
Abweichung nach innen in Kurvenmitte	<ul style="list-style-type: none"> • Hindernis innen in Kurvenmitte • Entgegenkommendes Fahrzeug fährt auf der Fahrbahnmittellinie

Tabelle F.4: Schwachstellen Überholvorgang

Schwachstelle	Anpassung
Falsche Position in rechtem Fahrstreifen	
Sehr frühes Wechseln des Fahrstreifens	Vorausfahrendes Fahrzeug bremsst mit - 8 m/s ²
Position in linkem Fahrstreifen	Überholtes Fahrzeug weicht nach links aus
Sehr großer Abstand zwischen Ego-Fahrzeug und vorausfahrendem Fahrzeug beim Fahrstreifenwechsel	Weiteres Fahrzeug am linken Fahrstreifen hinter dem Ego-Fahrzeug