



Graz University of Technology

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Beurteilung des Fahrverhaltens bei unterschiedlichen Automatisierungsstufen mittels Fahrsimulator

MASTERARBEIT

vorgelegt von

Georg Hanzl, BSc.

bei

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fellendorf

Technische Universität Graz

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Graz, 07. Mai 2018

Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 14.01.2013
Genehmigung des Senats am 27.05.2013.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtliche und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, _____

Georg Hanzl, BSc.

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, _____

Georg Hanzl, BSc.

Aufgabenstellung für die Masterarbeit

von Georg Hanzl, BSc.

Graz, 26.10.2016

Funktionale Szenarienanalyse des Fahrverhaltens mittels Fahrsimulator

Problemstellung

Mobilität ist ein großes Bedürfnis der Menschen. Durch die Entwicklung und die Serienproduktion der Personenkraftwagen wurde einer breiten Masse die Möglichkeit geboten, ihre Mobilität flexibler als je zuvor auszuleben. Seither wird versucht, dieses Mobilitätsangebot sicherer und komfortabler zu gestalten. Ein großes Thema, das gerade in den letzten Jahren immer stärker öffentlichkeitswirksam zur Sprache kommt, ist das Thema „Automatisiertes Fahren“.

Von selbstfahrenden Autos erhofft man sich eine Steigerung der Verkehrssicherheit und des Komforts. Seitens der Infrastruktur erwartet man sich eine höhere Leistungsfähigkeit von bestehenden Straßen, da beispielsweise die Sicherheitsabstände zwischen den Fahrzeugen verkürzt werden könnten. Die Entwicklung und Einführung autonomer Fahrzeuge bedarf jedoch eines hohen technischen und finanziellen Aufwands. Gerade die Entwicklung und Produktion diverser Mess-, Regelungs-/Steuerungs- und Überwachungssysteme wird sowohl in der Infrastruktur- als auch in der Automobilindustrie in den nächsten Jahren und Jahrzehnten ein großes Forschungsgebiet darstellen. Der Übergang zu fahrerlosen Fahrzeugen wird eine schrittweise Entwicklung und eine laufende Verbesserung der Systeme erfordern. Um diese Umstellung geordnet durchzuführen und eine einheitliche Definition dieser Umstellungsschritte zu erhalten, hat die Society of Automotive Engineers (kurz: SAE International) sechs Kategorien festgelegt. Diese reichen von Level 0 (keine Unterstützung beim Fahren durch das Fahrzeug) bis Level 5 (das Fahrzeug fährt von alleine / es wird kein Fahrer benötigt).

Für die Verkehrsplanung und die Betreiber der Straßeninfrastruktur sind vor allem die Auswirkungen der einzelnen Einführungs- und Durchdringungsstufen auf die bestehende Infrastruktur von Interesse. Fahrerassistenzsysteme bieten ein Potenzial zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit, des Fahrkomforts und der Fahrsicherheit. Große Herausforderungen stellen jedoch das Sicherheitskonzept und die Zuverlässigkeit der Funktionen bei der Vielfalt von real möglichen Szenarien, die sich aus der Wechselwirkung zwischen Fahrer, Fahrzeug und Verkehrssituation ergeben. Um das Fahrverhalten für unterschiedliche Fahrsituationen untersuchen zu können, bieten sich Studien mit Fahrsimulatoren an.

Gegenüber der Durchführung von Studien im Straßenverkehr hat die Fahrsimulation zwei wesentliche Vorteile: Im Simulator können Verkehrsszenarien hergestellt und in der gleichen Weise immer wieder reproduziert werden. So können Probanden mit Szenarien konfrontiert werden, die in der Realität nur selten vorkommen. Auch Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmern können gezielt hergestellt werden, was im Straßenverkehr so nur schwer möglich ist.

Aufgabenstellung

Die folgende Liste enthält wesentliche Bearbeitungspunkte der vorliegenden Masterarbeit. Abweichungen mit fortschreitendem Erkenntnisstand während der Bearbeitung sind möglich:

- Literaturanalyse zum Thema Fahrverhalten und zum Thema des automatisierten Fahrens und damit einhergehenden Veränderungen der Fahrverhaltensparameter
- Testszenariengenerierung von mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen an hochrangigen Netzabschnitten
 - Unterschiedliche Ausbauvarianten der Strecke
 - Berücksichtigung unterschiedlicher Verkehrsstärken
 - Variation unterschiedlicher Fahrverhalten, mit Fokus auf automatisiertem Fahren unterschiedlicher SAE-Stufen
- Überprüfung der Mikrosimulationen am FTG-Fahrsimulator für eine definierte Anzahl an zuvor erstellten Mikrosimulationsszenarien
- Aufbereitung der gewonnenen Daten des Fahrsimulators für Mikrosimulationen
- Bestimmung des funktionalen Zusammenhangs der automatisierten Fahrverhalten auf die Leistungsfähigkeit der Testszenarien

Für die Anfertigung der Masterarbeit wird die Verkehrsflusssoftware VISSIM sowie Statistiksoftware (r-project) am Institut für Straßen- und Verkehrswesen zur Verfügung gestellt. Der Diplomand verpflichtet sich, die Software sowie die bereitgestellten Daten ausschließlich zur Anfertigung der Masterarbeit zu nutzen und bei der Datenaufbereitung und Datenanalyse der zur Verwendung gestellten Daten Datenschutzrichtlinien einzuhalten.

Die Arbeit ist zweifach mit allen Anlagen in DIN A4 gebunden einzureichen. Ein Datenträger mit dem Masterarbeitstext, Präsentationen sowie allen Modelldaten ist beizulegen.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fellendorf
Tel. +43 316 873 6220
martin.fellendorf@tugraz.at
Institut für Straßen- und Verkehrswesen
TU Graz
Betreuer

Dipl.-Ing. Michael Haberl, BSc
Tel. +43 316 873 6226
michael.haberl@tugraz.at
Institut für Straßen- und Verkehrswesen
TU Graz
mitbetreuender Assistent

Kurzfassung

Beurteilung des Fahrverhaltens bei unterschiedlichen Automatisierungsstufen mittels Fahrsimulator

110 Seiten, 87 Abbildungen, 6 Tabellen

Das Thema "Automatisiertes Fahren" sorgte in den vergangenen Jahren in den Medien immer wieder für Schlagzeilen. Seien es die ersten Fahrversuche automatisierter Fahrzeuge im Straßenverkehr oder aber deren ersten Unfälle, die Menschen verfolgen mit Spannung die Entwicklungen der neuen Mobilität. Zugleich erscheinen auch immer mehr Studien und Forschungsberichte, welche – im Zusammenhang mit automatisiertem Fahren – auf die Vorzüge bezüglich Reisezeitersparnis und die stabilisierende Wirkung auf den Verkehrsfluss hinweisen. Diese Effekte setzen jedoch meist eine hohe Durchdringungsrate von automatisiert fahrenden Fahrzeugen voraus.

In der Vergangenheit hat sich gezeigt, dass die Durchdringungsrate neu eingeführter Fahrzeugtechnologien im Straßenverkehr erst über einen längeren Zeitraum steigt. Somit ist davon auszugehen, dass es auch im Hinblick auf die Einführung automatisierter Fahrzeuge im realen Verkehr einen längeren Zeitraum geben wird, in welchem sich ein Mischverkehr zwischen Fahrzeugen ohne automatisierten Fahrfunktionen und Fahrzeugen mit automatisierten Fahrfunktionen in unterschiedlichen Automatisierungsstufen ergeben wird.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde auf die Komponente „Mensch“ im Mischverkehr eingegangen. Dabei sollte sowohl das subjektive Empfinden als auch das Fahrverhalten bei Interaktionen mit automatisierten Fahrzeugen aufgenommen und anschließend ausgewertet werden. Für diese Aufgabenstellung bot sich die Durchführung einer Probandenstudie mittels eines Fahrsimulators an.

Da zunächst die Einführung automatisierter Fahrfunktionen in konfliktarmen Verkehrssituationen (wie z.B. auf Autobahnen) am wahrscheinlichsten ist, wurde für diese Studie ein rund 14 km langer, dreistreifiger Autobahnabschnitt mit drei Ab- bzw. Auffahrten und zwei Verflechtungsstrecken modelliert. Diese Teststrecke wurde von 24 Probanden in einem Fahrsimulator jeweils drei Mal durchfahren. Dabei wurde das Fahrverhalten der zusätzlich eingespielten Fahrzeuge variiert. So wurde ein Referenzszenario mit einem Fahrverhalten entsprechend SAE level 0 erstellt. Im zweiten und dritten Szenario wurden den zusätzlich simulierten Fahrzeugen automatisierte Fahrfunktionen entsprechend dem SAE level 4 zugewiesen, wobei die eingehaltenen Sicherheitsdistanzen bei Folgefahrten variiert wurden.

In den Auswertungen des subjektiven Befindens der Probanden zeigte sich, dass die Fahrverhalten entsprechend SAE level 0 den meisten Zuspruch fanden. Sowohl im Folgeverhalten als auch im Fahrstreifenwechselverhalten wurden die eingehaltenen Abstände und die aufgetretenen Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhalten der Fahrzeuge mit automatisierten Fahrfunktionen durchschnittlich stärker kritisiert als in dem Szenario mit einem Fahrverhalten entsprechend SAE level 0. Zusätzlich zu den Befragungen wurden die Fahrverhalten der Probanden ausgewertet. Dabei wurden die Trajektorien des virtuellen Fahrzeugs des Probanden und aller Fahrzeuge in dessen Nähe abhängig vom jeweiligen Szenario analysiert. Insbesondere wurden die eingehaltenen Sicherheitsabstände bei Folgefahrten und bei Fahrstreifenwechseln untersucht und mit jenen der anderen Szenarien verglichen. Dabei zeigte sich, dass es keine wesentlichen Änderungen der Sicherheitsabstände bei Folgefahrten oder Fahrstreifenwechseln durch die Probanden gab.

Abstract

Assessment of driving behaviour at different levels of automatization based on a driving simulator

110 pages, 87 figures, 6 tables

In the past few years “automated driving” has constantly made headlines in the media. People are curiously watching the developments of the new mobility, either the first road tests of automated vehicles have been published or their first accidents. At the same time more and more studies and research reports appear. These studies and reports are pointing out the advantages of “automated vehicles” in terms of i.e. travel time savings or the stabilizing effects on the traffic flow. However, these effects usually require a high penetration rate of automated vehicles.

Empiricism shows that the permeation rate of newly introduced vehicle technologies in road traffic has usually been increasing over an extensive period of time. From these observations, it may be concluded that there will exist a certain introduction phase of “automated driving”, during which a mixed traffic of both, vehicles without automated driving functions and vehicles with automated driving functions (with different levels of automation) will appear.

In this master thesis the component “human being” in mixed traffic is discussed. The goal is to investigate the subjective perception of the human drivers, as well as their driving behaviour during interaction with automated vehicles. Both parameters should be recorded and subsequently benchmarked. The determined approach for this study was to do research on human subjects by launching them into a driving simulator.

Since the introduction of automated driving functions will initially occur most likely on highways, a 14 kilometre long three-lane-motorway with five intersections has been modelled for this study. This test route was then cruised three times in a driving simulator by each of the 24 probands. In each of those three scenarios the simulated vehicles got either a human (pursuant SAE level 0) or an automated driving behaviour (matching SAE level 0) with two different follow distances.

The subjective opinion of the probands showed that interactions with vehicles with a driving behaviour according to SAE level 0 were preferred. The safety distances and the speed and accelerating behaviour in the following and lane changing behaviour were criticised more than in the scenario with vehicles without automated driving functions. Additionally, the trajectories of the probands and the surrounding vehicles were analysed depending on the scenario in question. The comparison of the safety distances of following vehicles and lane changes with those of the other scenarios showed that there were no essential changes in the different scenarios.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Abbildungsverzeichnis.....	v
Tabellenverzeichnis.....	ix
Abkürzungsverzeichnis.....	xi
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen.....	4
2.1 Automatisierte Fahrfunktionen.....	4
2.2 Fahrzeugfolgeverhalten in Mikrosimulationsmodellen.....	6
2.2.1 Kinematisches Abstandsmodell.....	6
2.2.2 Gazis-Herman-Rothery-Modell (GHR).....	7
2.2.3 Gipps-Modell.....	8
2.2.4 Psycho-physisches Abstandsmodell.....	9
2.3 Fahrstreifenwechsel in Mikrosimulationen.....	13
2.3.1 Fahrstreifenwechselmodell nach Gipps.....	14
2.3.2 Fahrstreifenwechselmodell nach Sparmann.....	15
2.3.3 Fahrstreifenwechselverhalten in VISSIM.....	15
2.4 Fahrdynamische Kenngrößen.....	16
2.4.1 Fahrdauer.....	17
2.4.2 Durchschnittliche Geschwindigkeit.....	17
2.4.3 Durchschnittliche positive Beschleunigung.....	17
2.4.4 Durchschnittliche negative Beschleunigung.....	18
2.4.5 Median der negativen Beschleunigung.....	18
2.4.6 maximale negative Beschleunigung.....	19
2.4.7 Standardabweichung der Beschleunigung (Beschleunigungsrauschen).....	19
2.5 Zeit bis zur Kollision (ttc).....	19
3 Aufbau der Simulationsumgebung.....	21
3.1 Verkehrsflussmodell.....	22
3.1.1 VISSIM.....	22
3.1.2 Streckenaufbau.....	24
3.1.3 Verkehrszuflüsse und Verkehrszusammensetzung.....	25
3.1.4 Fahrverhalten der VISSIM-Fahrzeuge.....	28
3.1.5 Fahrverhalten SAE level 0.....	29
3.1.6 Fahrverhalten SAE level 4.....	33
3.2 Fahrsimulator.....	35

3.3	Probandenstudie	36
4	Datenauswertung des subjektiven Befindens	39
4.1	Soziodemographie und Mobilitätsverhalten	39
4.2	Fahrverhaltensbewertungen der Simulationsszenarien	41
4.3	Allgemeine Fragen zum Fahr Simulator	47
4.4	Allgemeine Fragen zum automatisierten Fahren	49
5	Software zur Datenanalyse der objektiven Kenngrößen	50
5.1	Struktur der Auswertungssoftware	52
5.2	Vorbereitung der Daten für die Auswertung	53
5.2.1	Steuerungsskript.R – steuerndes Skript	53
5.2.2	Surrounding.R – Datenreduzierung	55
5.2.3	Diagramms.R – Vorbereitungen für die ersten Auswertungen und die Erstellung erster Übersichtsdiagramme	61
5.3	Auswertung des Längsverhaltens	61
5.3.1	follow.R – Analyse des Folgeverhaltens	61
5.3.2	fahrdyn_Kenngroessen.R – Berechnung d. fahrdynamischen Kenngrößen	63
5.4	Auswertung des Querverhaltens	64
5.4.1	LC.R – Vorbereitung der detaillierten Auswertung und Erstellung erster Umgebungsgrafiken bei den Fahrstreifenwechseln des Ego-Fahrzeugs	64
5.4.2	timeframe.R – Analyse der Zeitspannen zwischen dem Aufkommen eines FS-Wechsel-Wunsches, dem protokollierten FS-Wechsel und dem Abschluss des FS-Wechsels	67
5.4.3	LC_Evaluation.R – Analyse der Zeitspanne zwischen dem Entschluss zum FS-Wechsel und dem protokollierten FS-Wechsel, sowie der Abstände zu den VISSIM-Fahrzeugen im Zeitpunkt des Entschlusses	69
5.5	Ergänzende Operationen und Grafikerstellungen	71
5.5.1	Boxplots.R – Grafische Darstellung der fahrdynamischen Kenngrößen	71
5.5.2	follow_Plots.R – Auswertung und grafische Darstellung der Folgeverhalten	71
5.5.3	LC_Plots.R – Auswertung und grafische Darstellung einzelner Fahrstreifenwechselverhalten	73
6	Ergebnisse	74
6.1	Folgeverhalten	74
6.1.1	Gesamtfahrt	74
6.1.2	Folgefahrten	81
6.2	Fahrstreifenwechselverhalten	91
7	Zusammenfassung und Ausblick	102
8	Glossar	106
9	Literaturverzeichnis	108

10 Anhang	111
10.1 Folge- und Fahrstreifenwechsellparameter für VISSIM	111
10.1.1 PKW im Szenario SAE 0	111
10.1.2 LKW im Szenario SAE 0	112
10.1.3 PKW im Szenario SAE 4 mit 0,9 Sekunden Sicherheitsabstand	113
10.1.4 LKW im Szenario SAE 4 mit 0,9 Sekunden Sicherheitsabstand	114
10.1.5 PKW im Szenario SAE 4 mit 1,8 Sekunden Sicherheitsabstand	115
10.1.6 LKW im Szenario SAE 4 mit 1,8 Sekunden Sicherheitsabstand	116
10.2 Permutation der Fahrverhalten in der Probandenstudie	117
10.3 Probandenfragebogen	118
10.3.1 Fragen zur Soziodemographie und zum Mobilitätsverhalten	118
10.3.2 Fahrverhaltensbewertung der Simulationsszenarien	119
10.3.3 Fragen zum Fahrsimulator	121
10.3.4 Fragen zum automatisierten Fahren	122
10.4 Ergänzende grafische Darstellungen der Fragebogenauswertungen	123
10.4.1 Probandenakquirierende Stellen	123
10.4.2 Soziodemographische Verteilungen	123
10.4.3 Allgemeine Fragen zum automatisierten Fahren und Fahrassistenzsystemen	125
10.5 Auszüge aus dem R-Code	127
10.5.1 follow.R	127
10.5.2 timeframe.R	130
10.5.3 Boxplots.R	133
10.5.4 follow_Plots.R	134
10.5.5 LC_Evaluation.R	136
10.5.6 Zusammenhang_Fahrdauer-Startposition.R	140
10.6 Untersuchtes Fahrverhalten der VISSIM-Fahrzeuge	142
10.6.1 Folgeverhalten bei Kolonnenbildung	142
10.6.2 Abweichungen vom gewünschten Fahrverhalten der VISSIM-Fahrzeuge bei Einspeisung eines externen Fahrverhaltens	143

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Einteilung der Automatisierungsstufen nach SAE Standard J3016.....	5
Abbildung 2 Kinematisches Abstandsmodell: Weg-Zeit-Diagramm [eigene Darstellung]	6
Abbildung 3 Schematische Darstellung der Wahrnehmung einer folgenden Fahrer-Fahrzeug-Einheit bei einer Folgefahrt [eigene Darstellung]	10
Abbildung 4 Psycho-physisches Fahrzeugfolgemodell nach Wiedemann [vgl. Wiedemann 1974].....	11
Abbildung 5 Bereiche bei Annäherung im Modell nach Wiedemann [eigene Darstellung]	12
Abbildung 6 Schema der Zonen im Gipps-Modell zur Überprüfung, ob ein Fahrstreifenwechsel nötig ist [eigene Darstellung]	14
Abbildung 7 Schema "time to collision" [eigene Darstellung]	20
Abbildung 8 Beteiligte Organisationen bei der Vorbereitung und Durchführung der Fahrsimulatorstudie [eigene Darstellung].....	21
Abbildung 9 Schematische Darstellung der Fahrstrecke [eigene Darstellung]	24
Abbildung 10 Einstreifige Einfahrt mit Rechtsabbiegestreifen laut RVS 03.05.13	24
Abbildung 11 Einstreifige Ausfahrt mit Rechtsabbiegestreifen laut RVS 03.05.13	24
Abbildung 12 Verflechtungsstrecke laut RVS 03.05.13	25
Abbildung 13 Schematische Darstellung der Beschleunigungsstreifen bei Einfahrt 1, 2 und 3 im FASI [eigene Darstellung]	25
Abbildung 14 Schematische Darstellung des Verzögerungsstreifens bei Ausfahrt 1, 2 und 3 im FASI [eigene Darstellung]	25
Abbildung 15 Schematische Darstellung der Verflechtungsstrecke bei Ausfahrt 4 und 5 im FASI [eigene Darstellung]	25
Abbildung 16 Beispielhafte Belastungsverhältnisse einer Einfahrt auf dreistreifiger Hauptfahrbahn [Geistefeldt, 2015].....	27
Abbildung 17 Aufteilung der Verkehrszuflüsse bei einer Einfahrt [eigene Darstellung]	27
Abbildung 18 Schema des Weg-Zeit-Diagramms zur Zeitpunktbestimmung des Zuflusses [eigene Darstellung]	28
Abbildung 19 Wunschgeschwindigkeitsverteilung für Pkws mit einem Fahrverhalten entsprechend SAE level 0	30
Abbildung 20 Wunschgeschwindigkeitsverteilung für Lkws mit einem Fahrverhalten entsprechend SAE level 0	30
Abbildung 21 Übersicht über die Pkw-Beschleunigungen (Wunschbeschleunigung links, Maximalbeschleunigung rechts)	31
Abbildung 22 Übersicht über die Pkw-Verzögerungen (Wunschverzögerung links, Maximalverzögerung rechts).....	31
Abbildung 23 Übersicht über die Lkw-Beschleunigungen (Wunschbeschleunigung links, Maximalbeschleunigung rechts)	32
Abbildung 24 Übersicht über die Lkw-Verzögerungen (Wunschverzögerung links, Maximalverzögerung rechts).....	32
Abbildung 25 Wunschgeschwindigkeitsverteilungen für Pkws (links) und Lkws (rechts) mit einem Fahrverhalten entsprechend SAE level 4	33
Abbildung 26 Fahrstreifenwechselmodell der Fahrzeuge, welche über die DLL gesteuert werden Fellendorf et al. [2010]	34

Abbildung 27 Aufbau des Fahrsimulators im FTG [Hammer, 2015].....	36
Abbildung 28 Innenperspektive des Fahrsimulators während der Probandenstudie	37
Abbildung 29 Zeitspanne des Führerscheinbesitzes	40
Abbildung 30 durchschnittliche Jahresfahrleistung mit dem Pkw	40
Abbildung 31 durchschnittliche Jahresfahrleistung auf Autobahnen und Schnellstraßen mit dem Pkw.....	41
Abbildung 32 Beurteilung des Fahrkomforts	42
Abbildung 33 Beurteilung des dynamischen Fahrverhaltens bei Folgefahrten	43
Abbildung 34 Beurteilung des dynamischen Fahrverhaltens beim Ein- und Ausfädeln	44
Abbildung 35 Beurteilung des Abstandsverhaltens bei Folgefahrten.....	45
Abbildung 36 Beurteilung des Abstandsverhaltens beim Ein- und Ausfädeln.....	46
Abbildung 37 Beurteilung des Fahrgefühls im FASI bezogen auf den Vergleich mit einem richtigen PKW	47
Abbildung 38 Beurteilung des persönlichen Fahrverhaltens im FASI verglichen mit jenem auf der Straße	48
Abbildung 39 Einschätzung der Veränderung des persönlichen Fahrverhaltens im FASI verglichen mit jenem auf der Straße.....	48
Abbildung 40 Aufkommender Stress durch die Fahrsimulatorstudie	49
Abbildung 41 Übersicht der ausgewerteten Kenngrößen.....	50
Abbildung 42 R-Skripte für die Analyse des Folge- (follow) und Fahrstreifenwechselverhaltens (lane change - LC)	52
Abbildung 43 Ergänzende R-Skripte, welche nicht über " Steuerungsskript.R" gesteuert wurden.....	53
Abbildung 44 Beispielhafte Dialogboxen um standardisierte Antworten zu erhalten	54
Abbildung 45 Schema der berücksichtigten Fahrzeugpositionen und -distanzen	58
Abbildung 46 Flussdiagramm der Beschleunigungsberechnung des Ego-Fahrzeugs.....	60
Abbildung 47 Auszug der ersten sechs Datensätze des data frames "dynLC" bei Proband 1 - SAE0	65
Abbildung 48 FS-Wechsel-Manöver 5 von Proband 8 (SAE4_1.8) beinhaltet FS-Wechsel 7 und 8	66
Abbildung 49 Stufen der Auswertung im „timeframe.R“ Skript	68
Abbildung 50 Schematische Übersicht der berücksichtigten Fahrstreifenwechsel-Manöver	70
Abbildung 51 Schematische Darstellung der Extremwertermittlung der Differenzgeschwindigkeit; Teil 1 [eigene Darstellung]	72
Abbildung 52 Schematische Darstellung der Extremwertermittlung der Differenzgeschwindigkeit; Teil 2 [eigene Darstellung]	73
Abbildung 53 Fahrdauern aufgeschlüsselt nach den Szenarien [eigene Darstellung]	75
Abbildung 54 Durchschnittliche Geschwindigkeiten aufgeschlüsselt nach den Szenarien [eigene Darstellung]	76
Abbildung 55 Durchschnittliche positive Beschleunigung aufgeteilt nach den Szenarien [eigene Darstellung]	77
Abbildung 56 Durchschnittliche negative Beschleunigung aufgeteilt nach den Szenarien [eigene Darstellung]	78
Abbildung 57 Beschleunigungsrauschen im Fahrverhalten der Probanden aufgeteilt nach den Szenarien [eigene Darstellung]	79
Abbildung 58 Maximale negativen Beschleunigungen aufgeteilt nach den Szenarien [eigene Darstellung]	80
Abbildung 59 Folgeverhalten von Proband 1 – SAE0 – bei rund 60 km/h	82
Abbildung 60 Folgeverhalten von Proband 5 - SAE4_0.9 - bei 60 km/h	83

Abbildung 61 Folgeverhalten von Proband 13 – SAE0 – bei ca. 100 km/h	84
Abbildung 62 Folgeverhalten von Proband 13 – SAE0 – 85 bis 120 km/h	85
Abbildung 63 Abstandsdiagramm der Folgefahrten im Bereich mit 130 km/h – SAE0	86
Abbildung 64 Abstandsdiagramm der Folgefahrten im Bereich mit 130 km/h – SAE4_0.9	87
Abbildung 65 Abstandsdiagramm der Folgefahrten im Bereich mit 130 km/h – SAE4_1.8	88
Abbildung 66 Abstandsdiagramm der Folgefahrten im Bereich mit 130 km/h – alle Szenarien	89
Abbildung 67 Abstandsdiagramm der Folgefahrten im Bereich mit 60 km/h – alle Szenarien	90
Abbildung 68 Untersuchte Fahrstreifenwechselmanöver	91
Abbildung 69 Genutzte Zeit-Lücke, um einen Fahrstreifenwechsel vor ein schnelleres Fahrzeug durchzuführen	93
Abbildung 70 „Zeit bis zur Kollision“ im Zeitpunkt der Entscheidung zum FS-Wechsel	94
Abbildung 71 Genutzte Zeit-Lücke um einen Fahrstreifenwechsel vor ein langsameres Fahrzeug durchzuführen	96
Abbildung 72 Zeitabstände zwischen den Fahrzeugen bei denen Probanden angegeben haben, dass ein zu knapper FS-Wechsel durch ein VISSIM-Fahrzeug stattfand	97
Abbildung 73 Geschwindigkeitsdifferenzen zum Zeitpunkt der Entscheidung zu einem FS-Wechsel durch das VISSIM-Fahrzeug	98
Abbildung 74 Zeit bis zur Kollision bei unveränderten Geschwindigkeiten zum Zeitpunkt, als das VISSIM-Fahrzeug einen FS-Wechsel beschlossen hat	99
Abbildung 75 Maximal aufgetretene Verzögerungen bei überraschenden FS-Wechsel	100
Abbildung 76 Minimale aufgetretene Distanz zwischen dem Ego-Fahrzeug und dem Fahrzeug welches sich auf dem Fahrstreifen vor dem Ego-Fahrzeug eingefädelt hat	101
Abbildung 77 Probandenakquirierende Stellen	123
Abbildung 78 Geschlechterverhältnis der Probanden	123
Abbildung 79 Altersverteilung der Probanden	124
Abbildung 80 Wohnsitz der Probanden	124
Abbildung 81 Bekanntheit von automatisiertem Fahren und Fahrassistenzsystemen	125
Abbildung 82 Nutzung von Fahrassistenzsystemen	125
Abbildung 83 Einschätzung der Veränderung der Fahrhäufigkeit durch automatisiertes Fahren	126
Abbildung 84 Erwartungen einer Vergrößerung der Fahrweiten	126
Abbildung 85 Wunsch von Fahrassistenzsystemen im nächsten Fahrzeug	127
Abbildung 86 Teilausschnitt einer Folgefahrt eines automatisierten Fahrzeugs im Platoon	142
Abbildung 87 Folgeabstände zweier VISSIM-Fahrzeuge unterschiedlicher Fahrzeugkategorien (LKW und PKW) in einem Szenario mit einem angestrebten Folgeabstand von 1,8 Sekunden	143

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Die wichtigsten Parameter aus der *.fzp-Datei	23
Tabelle 2 Richtwerte für Leistungsfähigkeiten bei Richtungsfahrbahnen mit Steigungen bis 2% laut RVS 03.01.11.....	26
Tabelle 3 Gewichtungsfaktoren der Antworten bei der Fahrverhaltensbewertung der Szenarien	41
Tabelle 4 Ermittlung des durchschnittlichen Befindens.....	42
Tabelle 5 Inhalte des <i>tabFront</i> data frames	62
Tabelle 6 Permutation der Fahrverhalten bei den FASI-Szenarien	117

Abkürzungsverzeichnis

ACC	Adaptive Cruise Control
aF	automatisiertes Fahren
API	Application Programming Interface (deutsch: Anwendungsprogrammierschnittstelle / Programmschnittstelle)
CACC	Cooperative Adaptive Cruise Control
*.csv	Comma-separated values (Dateiendung)
df	data frame
div.	diverse
DLL	Dynamik Link Library (auch *.dll als Dateiendung)
DTV _{MS}	Durchschnittlicher täglicher Verkehr – Montag bis Sonntag
EKG	Elektrokardiogramm
FASI	Fahr Simulator
FFE	Fahrzeug-Fahrer-Einheit
FS	Fahrstreifen
<i>fS</i>	<i>fullSurrounding – data frame</i>
FTG	Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Graz
Fzg	Fahrzeug
*.fzp	Fahrzeugprotokoll (Dateiendung)
HBS	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen
HFB	Hauptfahrbahn
ID	Identifikationsnummer
IV	Individueller Verkehr
kdm	Kinematic distance model (deutsch: Kinematisches Abstandsmodell)
Kfz	Kraftfahrzeug
LoS	Level of Service (Angebotsqualität / Verkehrsqualität)
mIV	motorisierter Individualverkehr
NFB	Nebenfahrbahn
nmIV	nicht motorisierter Individualverkehr
ÖV	Öffentlicher Verkehr
Pkw-E	Pkw-Einheiten (z.B. 1 Lkw = 2 Pkw-E auf Autobahnen laut FGSV [2015])
RVS	Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen
SAE	Society of Automotive Engineers (deutsch: Verband der Automobilingenieure)
SVT	Streckenverhaltenstyp
ttc	time to collision
V2V	vehicle to vehicle communication (Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation)

1 Einleitung

Spätestens seit Tesla und Google die ersten Bemühungen in Richtung autonomes Fahren gestartet haben, ist dieses Thema in den Fokus der Öffentlichkeit gerückt. Seither haben verschiedenste Unternehmen der Automobilbranche bereits Ankündigungen zu geplanten Markteinführungen (hoch-)automatisierter Fahrzeuge innerhalb der nächsten Jahre ausgesprochen (siehe [driverless-future]¹).

Die Infrastrukturbetreiber haben daher ein großes Interesse daran, die Auswirkungen dieser zeitnahen Entwicklungen im Mobilitätssektor optimal abzuschätzen. Es gilt unter anderem zu ermitteln, welche Änderungen sich im Mobilitätsverhalten der Verkehrsteilnehmer und in Bezug auf die Verfügbarkeiten bestehender Straßennetze ergeben (vgl. Sukennik et al. [2017]). Nachdem es absehbar ist, dass automatisiertes Fahren (aF) zuerst im hochrangigen Straßennetz Einzug hält (vgl. [bmvit-infothek]²), sind die Betreiber dieser Netze bestrebt, frühestmöglich die Auswirkungen dieser Entwicklungen beurteilen zu können. Hierfür wird in zahlreichen Studien (beispielsweise bei Krause et al. [2017], Sukennik et al. [2017] und Friedrich [2015]) eine Abschätzung der Leistungsfähigkeiten bestehender Straßennetze bei unterschiedlichen Durchdringungsraten automatisierter Fahrzeuge im Verkehr mittels unterschiedlicher Verkehrsflussmodellen vorgenommen. Diese Studien beruhen auf der Annahme, dass durch die eingesetzten technischen Hilfsmittel genauere Messungen im Hinblick auf Geschwindigkeitsdifferenzen und Distanzen zu anderen Verkehrsteilnehmern (oder Objekten) durchführbar sind. Diese Messergebnisse stellen die Grundlage für die automatisierten Reaktionen (in Form von Geschwindigkeitsanpassungen) durch das Fahrzeug dar. Diese Form der Automatisierung erlaubt es, bei hohen Geschwindigkeiten deutlich kürzere Distanzen zwischen den Fahrzeugen einzuhalten, ohne Einbußen auf Kosten der Verkehrssicherheit hinnehmen zu müssen. Die Verkehrsstärke (das ist die Anzahl der Fahrzeuge, welche einen Querschnitt innerhalb einer definierten Zeit passiert) kann durch die verkürzten Abstände bei den hohen Geschwindigkeiten deutlich höher ansteigen, bevor der Verkehrsfluss aufgrund von Überlastung zusammenbricht. Diese Erhöhung der möglichen Verkehrsstärke (= Kapazität) führt zu einer Reduktion der Staus und der Reisezeiten (bei hohem Verkehrsaufkommen), sowie zu einer allgemeinen Verbesserung der Qualität des Verkehrsablaufs [Friedrich, 2015].

Die Effekte der Kapazitätssteigerung durch aF setzen allerdings stets voraus, dass ein hoher Anteil der Fahrzeuge diese Art der Assistenzsysteme verwendet. Busch et al. [2017] haben eine Prognose zu der Entwicklung der Fahrzeugflotte in Deutschland – in Bezug auf automatisierte Fahrfunktionen – auf Basis der folgenden Annahmen entwickelt:

- Die Einführung der Automatisierung beginnt in der oberen Fahrzeugklasse.
- Es gibt in der nahen Zukunft keine Änderung der Rechtslage, welche die Einführung der automatisierten Fahrfunktionen beschleunigt.

Aus dieser Prognose geht hervor, dass eine Durchdringung des Verkehrs mit automatisiert fahrenden Fahrzeugen schrittweise, über mehrere Jahre hinweg, stattfinden wird. Das bedeutet, dass eine Durchmischung des Verkehrs von automatisierten Fahrzeugen unterschiedlicher Automatisierungsstufen mit Fahrzeugen ohne automatisierte Fahrfunktionen stattfinden wird. Dadurch wird in näherer Zukunft ein „Mischverkehr“ aus automatisiert fahrenden Fahrzeugen und

¹ Verfügbar unter: http://www.driverless-future.com/?page_id=384, [Datum des Zugriffs: 03.01.2018]

² Verfügbar unter: <https://infothek.bmvit.gv.at/autonome-autos-vom-fahrer-zum-passagier/>, [Datum des Zugriffs: 06.03.2018]

konventionellen Fahrzeugen entstehen. Der Mensch wird also weiterhin eine wichtige Rolle im Verkehr spielen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, den Faktor Mensch in Untersuchungen im Zusammenhang mit automatisierten Fahrverhalten einzubeziehen. Dazu gehört unter anderem auch die Analyse des menschlichen Fahrverhaltens bei Interaktionen mit automatisierten Fahrzeugen. Hierbei ergibt sich die Frage, ob sich Änderungen im menschlichen Fahrverhalten bemerkbar machen und welche Konsequenzen dies für den Einsatz von automatisierten Fahrzeugen im realen Verkehr hat.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit eine Fahrsimulatorstudie durchgeführt, anhand welcher das menschliche Befinden und das menschliche Fahrverhalten während einer Interaktion mit automatisiert fahrenden Fahrzeugen (unterschiedlicher Automatisierungsstufen) analysiert wurde. Dabei wurden Änderungen im menschlichen Fahrverhalten bei den genannten Interaktionen in Hinblick auf die eingehaltenen Sicherheitsabstände bei Folgefahrten und bei Fahrstreifenwechseln untersucht. Durch eine Verwendung der selben Verkehrsflussmodelle bei den einzelnen Probanden konnten die Fahrverhalten der Probanden auf Unterschiede oder Parallelen unter den selben Rahmenbedingungen (z.B. Verkehrsstärke, Verteilung der an Knotenpunkten zu- und abfließenden Fahrzeuge, Geschwindigkeitsverteilungen etc.) überprüft werden. Zusätzlich konnte den anderen im Modell eingesetzten Fahrzeugen ein Fahrverhalten entsprechend der gewünschten Automatisierungsstufe zugewiesen werden. Die Simulation ermöglichte in weiterer Folge die Analyse von Interaktionen mit automatisierten Fahrzeugen, welche in dieser Form im realen Verkehr (noch) nicht auftreten.

In Kapitel 2 werden zunächst die Grundlagen zum Thema „automatisiertes Fahren“ und Verkehrsflusssimulation erläutert. Dabei wird eine mögliche Einteilung der Automatisierungsstufen von Fahrzeugen aufgezeigt. Ausgehend von diesen Automatisierungsstufen werden verschiedene Fahrverhalten in einem Verkehrsflussmodell implementiert, mit welchen Probanden im Rahmen einer Simulatorstudie interagieren. Um ein Verständnis für das Fahrverhalten zu erhalten, wird in diesem Kapitel eine ausgewählte Anzahl an Fahrstreifenwechselmodellen und Folgemodellen dargestellt. Für den Vergleich der Fahrverhalten bei Interaktionen mit Fahrzeugen unterschiedlicher Automatisierungsstufen bietet sich eine Analyse von fahrdynamischen Kenngrößen an. Daher werden am Ende von Kapitel 2 die in weiterer Folge untersuchten Kennwerte beschrieben.

Kapitel 3 widmet sich dem Aufbau der Simulationsumgebung. Zunächst wird die Erstellung des Verkehrsflussmodells behandelt, wobei an dieser Stelle einige Besonderheiten des Simulationprogrammes beleuchtet werden. In den darauffolgenden Unterabschnitten wird ausführlicher auf den Streckenaufbau, die Ermittlung und Auswahl der Zuflussmengen und die unterschiedlichen modellierten Fahrverhalten eingegangen. Anschließend wird in einem kurzen Abschnitt der Aufbau des Fahrsimulators erläutert, bevor der Ablauf der Probandenstudie behandelt wird.

In Kapitel 4 werden Auswertungen der Simulatorstudie hinsichtlich des subjektiven Befindens der Probanden in unterschiedlichen Szenarien der Automatisierung dargestellt. Dabei wird anfänglich ein kurzer Überblick über die soziodemographischen Daten und das aktuelle Mobilitätsverhalten der Probanden geben. Anschließend erfolgt eine Zusammenfassung der Fahrverhaltensbewertungen aufgeschlüsselt nach den jeweiligen Szenarien. Die Betrachtung der allgemeinen Fragen zum Fahrsimulator im Fragebogen ermöglicht die Beurteilung des Fahrgefühls der Probanden im Simulator. Am Ende dieses Kapitels wurden die Angaben der Probanden bezüglich der persönlichen Auseinandersetzung mit dem Thema „automatisiertes Fahren“ zusammengefasst.

Die Analyse von objektiven Kenngrößen (Fahrverhaltensparameter) wird in Kapitel 5 beschrieben. Dabei wird auf die Auswertung mittels der frei zugänglichen Statistiksoftware „R“ eingegangen. Nachdem die im Fahrsimulator aufgezeichneten Daten einen großen Umfang aufgewiesen haben, wurden diese Daten über mehrere Schritte gefiltert und reduziert. Im ersten Abschnitt wird dabei die Datenaufbereitung und der erste Filterschritt behandelt. Der zweite und dritte Abschnitt befassen sich mit den Filterungen und Auswertungen des Folge- und Fahrstreifenwechselverhaltens. Im letzten Abschnitt werden Situationen analysiert.

In Kapitel 6 werden die Ergebnisse nach dem Folgeverhalten und dem Fahrstreifenwechselverhalten aufgeschlüsselt präsentiert.

Abschließend gibt Kapitel 7 eine Zusammenfassung samt einem Ausblick wieder. Zusätzlich wurden in diesem Kapitel Hinweise auf weitere Projekte mit dem Fahrsimulator und Erkenntnisse für zukünftige mikroskopische Simulationen angeführt.

2 Grundlagen

Um das Fahrverhalten zu analysieren, gibt es verschiedene Möglichkeiten wie beispielsweise die Beobachtung von Verkehrsphänomenen oder der Einsatz eines Messfahrzeugs im Verkehrsfluss. Vielfach wird das Fahrverhalten aber über Fahrsimulatoren untersucht, da diese eine hohe Reproduzierbarkeit und gezielte Versuchsanordnungen ermöglichen. Für eine realitätsgetreue Darstellung der Fahrsituationen werden üblicherweise neben einem Probanden weitere virtuelle Verkehrsteilnehmer in die Simulation eingebunden. Damit die Bewegungsabläufe der virtuellen Verkehrsteilnehmer für den Probanden nicht unnatürlich wirken, werden die virtuellen Fahrzeuge über ein entsprechendes Verkehrsmodell gesteuert.

Die Verkehrsmodellierung fällt dabei in das Repertoire der Ingenieurwissenschaften. Das heißt, es wird versucht, die in der Natur beobachteten Verkehrsphänomene in einem idealisierten System wiederzugeben, um darauf aufbauende Rückschlüsse ziehen und Vorhersagen treffen zu können. Dabei sind die Fragestellungen an die Verkehrsmodellierung sehr breit gestreut. Heutzutage wird die Verkehrsmodellierung üblicherweise unterteilt in den Bereich der Verkehrsplanung und der Verkehrsflusssimulation. Beide Bereiche beschäftigen sich mit zeitlich veränderlichen Verkehrsphänomenen (Vgl. Treiber & Kesting [2010]). Für die Verkehrsplanung wird auch der Begriff „makroskopische Modellierung“ verwendet, da sie sich auf die „Modellierung großer Räume“ (Fellendorf & Friedrich [2001]) bezieht. Die Verkehrsplanung geht von längeren Zeiträumen (Tage bis Jahre) aus. Dabei untersucht sie beispielsweise, welche Folgen Veränderungen der Verkehrsnetze haben (z.B. der Bau einer neuen Umfahrungsstraße oder eine neue Linie im öffentlichen Verkehr) (Vgl. Treiber & Kesting [2010]). Zusätzlich können über die Verkehrsplanung Fragestellungen bezüglich zukünftiger Verkehrsmittelwahlen, Routenwahlen, Anzahl der zurückgelegten Wege und Ähnliches berücksichtigt werden. Im Gegensatz dazu beschäftigt sich die Verkehrsflusssimulation (auch „mikroskopische Modellierung“ genannt) mit der Analyse und der Optimierung des Verkehrsflusses unter Berücksichtigung stochastischer Fahrverhalten (Vgl. Fellendorf & Vortisch [2010]). Als zeitlicher Rahmen werden in der Verkehrsflusssimulation häufig nur wenige Stunden betrachtet. Laut Treiber & Kesting [2010] wird hierbei das „menschliche Fahrverhalten [...] untersucht“.

Diese Modellansätze bieten eine gute Basis dafür, aktuelle Fragen zum Verkehrsaufkommen, Ausbau von (zukünftig nötigen) Verkehrsinfrastrukturen, Wirkung von verkehrsbeeinflussenden Maßnahmen, aber auch Änderungen des Verkehrsverhaltens durch neue Technologien zu beantworten. Im Abschnitt 2.1 wird auf eine mögliche Einteilung der Automatisierungsstufen eingegangen. Dabei werden die technologischen Entwicklungen betrachtet, die dem jeweiligen Automatisierungsgrad zugeordnet werden können. Abhängig von dem Automatisierungsgrad ergeben sich unterschiedliche Möglichkeiten, wie sich der Verkehrsfluss gestalten und ändern kann. Die Modellbildung des Verkehrsflusses und die Entwicklungen bzw. die unterschiedlichen Ansätze der Modellierung werden daher in den Abschnitten 2.2 und 2.3 näher beschrieben. Die fahrdynamischen Eigenschaften und deren Berechnung, welche für die Auswertungen und einen Vergleich der Fahrverhalten am Ende dieser Arbeit erforderlich sind, sind im Abschnitt 2.4 erklärt.

2.1 Automatisierte Fahrfunktionen

Die fortschreitenden Weiterentwicklungen in der Fahrzeugtechnik bieten den Fahrern immer mehr Unterstützung bei der Fahrt. Durch verschiedenste Assistenten wird dem Fahrer geholfen, die Spur zu halten und in Notsituationen eine rechtzeitige Notbremsung zur Schadensminimierung

einzuweisen. Spätestens jedoch seitdem das Fahrassistenzsystem von Tesla auf dem Markt ist, ist für jedermann ersichtlich, dass der Einsatz von hochautomatisierten Fahrzeugen nur mehr eine Frage der Zeit ist. Um einen geregelten Übergang von den konventionellen Fahrzeugen zu den automatisiert fahrenden Fahrzeugen zu gewährleisten, hat unter anderem die globale Vereinigung „SAE international“ eine Standardisierung verschiedener zu erwartender Automatisierungsstufen im Automobilbereich vorgenommen. Diese können laut SAE Standard J3016 wie folgt beschrieben werden:

- **SAE level 0:** Die Steuerung des Fahrzeugs obliegt ausschließlich dem Fahrer, selbst falls Warnsysteme vorhanden sind.
- **SAE level 1:** Der Fahrer kann eine Aufgabe (Spurhaltung oder das Beschleunigungsverhalten) dem Fahrzeug überlassen, muss aber ständig diese Aufgaben selbst überwachen und jederzeit eingriffsbereit sein.
- **SAE level 2:** Der Fahrer kann sowohl die Spurhaltung als auch das Beschleunigungsverhalten dem Fahrzeug überlassen. Er muss jedoch weiterhin den Verkehr beobachten und das dynamische Fahrverhalten mitbestimmen.
- **SAE level 3:** Das „System“ steuert das Fahrzeug vollständig, der Fahrer muss jedoch nach einer Aufforderung des Systems intervenieren und die Steuerung übernehmen.
- **SAE level 4:** Das „System“ steuert das Fahrzeug vollständig und kann auch ohne Eingreifen des Fahrers nach einer Aufforderung die dynamische Fahrsituation managen.
- **SAE level 5:** Das „System“ steuert das Fahrzeug vollständig in jeder Situation und unter allen (Straßen- und Umwelt-) Bedingungen.

SAE level	Name	Narrative Definition	Execution of Steering and Acceleration/Deceleration	Monitoring of Driving Environment	Fallback Performance of Dynamic Driving Task	System Capability (Driving Modes)
Human driver monitors the driving environment						
0	No Automation	the full-time performance by the <i>human driver</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> , even when enhanced by warning or intervention systems	Human driver	Human driver	Human driver	n/a
1	Driver Assistance	the <i>driving mode</i> -specific execution by a driver assistance system of either steering or acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the <i>human driver</i> perform all remaining aspects of the <i>dynamic driving task</i>	Human driver and system	Human driver	Human driver	Some driving modes
2	Partial Automation	the <i>driving mode</i> -specific execution by one or more driver assistance systems of both steering and acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the <i>human driver</i> perform all remaining aspects of the <i>dynamic driving task</i>	System	Human driver	Human driver	Some driving modes
Automated driving system (“system”) monitors the driving environment						
3	Conditional Automation	the <i>driving mode</i> -specific performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the dynamic driving task with the expectation that the <i>human driver</i> will respond appropriately to a <i>request to intervene</i>	System	System	Human driver	Some driving modes
4	High Automation	the <i>driving mode</i> -specific performance by an automated driving system of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> , even if a <i>human driver</i> does not respond appropriately to a <i>request to intervene</i>	System	System	System	Some driving modes
5	Full Automation	the full-time performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> under all roadway and environmental conditions that can be managed by a <i>human driver</i>	System	System	System	All driving modes

Abbildung 1 Einteilung der Automatisierungsstufen nach SAE Standard J3016

2.2 Fahrzeugfolgeverhalten in Mikrosimulationsmodellen

Das Longitudinalverhalten (auch Längsverhalten oder Folgeverhalten genannt) in Mikrosimulationen (= Verkehrsflussimulationen) stellt im Wesentlichen die Geschwindigkeiten, sowie das (Brems- und) Beschleunigungsverhalten und den Ruck der Fahrzeuge in Längsrichtung dar. Dabei soll mit verschiedenen Modellansätzen, das menschliche Folgeverhalten möglichst realitätsnahe mathematisch beschrieben werden. Die dafür gebildeten mathematischen Formeln dienen dazu, die Bearbeitung der Verkehrsflussmodelle mittels Computer durchführen zu können. Dadurch lassen sich komplexe und umfangreiche Situationen simulieren und auswerten. In den nachfolgenden Unterabschnitten wird ein Überblick über die ersten einfachen Ansätze bis hin zu komplexen Folgemodellen geliefert.

2.2.1 Kinematisches Abstandsmodell

Wie bei Treiber & Kesting [2010] beschrieben, implementierten die Ansätze von Pipes und Reuschel bereits Anfang der 1950er Jahre einen Grundgedanken, welcher heutzutage noch in vielen Köpfen tief verankert ist:

„Der Mindestabstand zum Vorderfahrzeug sollte proportional zur Geschwindigkeit sein oder, anders formuliert, die ‚Zeitlücke‘ sollte einem vorgegebenen Zielwert entsprechen.“

Bei diesem Ansatz reagiert ein Fahrzeug auf die Geschwindigkeitsänderungen seines Vordermanns und passt sich diesen an. Das Kinematische Abstandsmodell (englisch: kinematic distance model, kurz: kdm) – wie von Treiber & Kesting [2010] beschrieben – ist eine einfache Herangehensweise, welche das Longitudinalverhalten bei Folgefahrten beschreibt. In Formel (2-1) wird die Beschleunigung eines sich annähernden Fahrzeugs abhängig von der Beschleunigung, der Geschwindigkeit und der Distanz des vorausfahrenden Fahrzeugs definiert.

Abbildung 2 zeigt ein Weg-Zeit-Diagramm eines Fahrzeugpaares, wobei das folgende Fahrzeug (punktierte Linie) anfangs eine höhere Geschwindigkeit ausweist als das führende Fahrzeug (durchgängige Linie). Im weiteren Verlauf wird die Geschwindigkeit des folgenden Fahrzeugs an jene des führenden Fahrzeugs angepasst. Ein Überholvorgang wird in diesem Fall nicht unternommen.

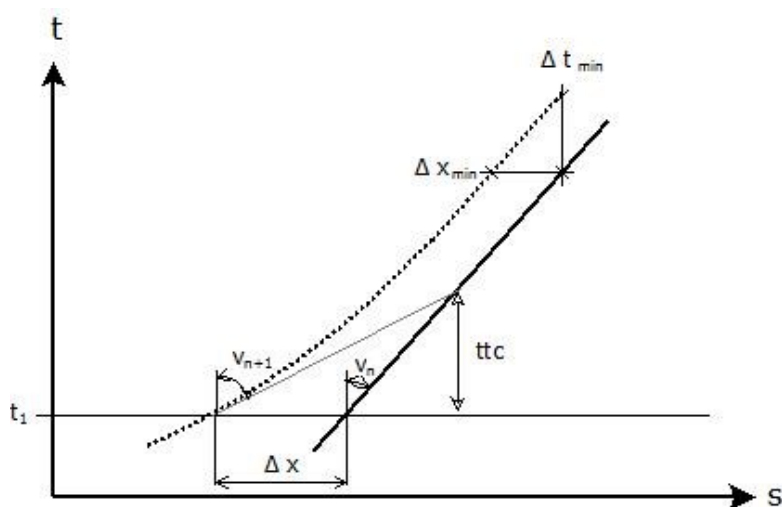


Abbildung 2 Kinematisches Abstandsmodell: Weg-Zeit-Diagramm [eigene Darstellung]

Das kinematische Abstandsmodell beruht auf einer einfachen Bewegungsgleichung. Formel (2-1) besagt, dass die Beschleunigung des folgenden Fahrzeugs $n+1$ abhängig ist von

- der Beschleunigung des führenden Fahrzeugs n ,

- der Wegstrecke bis zum Erreichen der Wunschkonzanz
- der Geschwindigkeitsdifferenz und
- der Zeit bis zur Kollision, falls die Geschwindigkeiten konstant gehalten werden.

$$a_{n+1} = a_n + (\Delta x - \Delta x_{min}) \cdot \frac{2}{ttc^2} + (v_n - v_{n+1}) \cdot \frac{2}{ttc} \quad (2-1)$$

a_n Beschleunigung des führenden (vorausfahrenden) Fahrzeugs

a_{n+1} Beschleunigung des (nach-) folgenden Fahrzeugs

ttc Zeit bis zu einem Unfall (siehe auch Abschnitt 2.5)

v_n Geschwindigkeit des führenden Fahrzeugs

v_{n+1} Geschwindigkeit des folgenden Fahrzeugs

Δx Aktueller Bruttoabstand = $x_n(t) - x_{n+1}(t)$

Δx_{min} Mindestbruttoabstand

2.2.2 Gazis-Herman-Rothery-Modell (GHR)

Gazis et al. [1961] entwickelten den Ansatz, dass ein folgendes Fahrzeug $n+1$ seine Geschwindigkeit in Relation zur Geschwindigkeitsdifferenz zum führenden Fahrzeug n anpasst. Heutige Modelle, welche auf dem GHR-Modell aufbauen, haben laut Dallmeyer [2014] die von Gazis et al. [1961] entwickelte Formel (2-2) als Basis.

$$a_{n+1}(t + T) = \alpha_0 \cdot \frac{(v_{n+1}(t + T))^m}{(\Delta x(t))^l} \cdot \Delta v(t) \quad (2-2)$$

α_0 Sensitivitätsfaktor

$a_{n+1}(t + T)$ Beschleunigung des folgenden Fahrzeugs im Zeitpunkt $t +$ Reaktionszeit T

l Konstante im Modell

m Konstante im Modell

T Reaktionszeit

$v_{n+1}(t + T)$ Geschwindigkeit des folgenden Fahrzeugs im Zeitpunkt $t +$ Reaktionszeit T

$\Delta v(t)$ Differenzgeschwindigkeit im Zeitpunkt $t = v_n(t) - v_{n+1}(t)$

$\Delta x(t)$ Aktueller Bruttoabstand = $x_n(t) - x_{n+1}(t)$

Der Sensitivitätsfaktor α_0 und die beiden konstanten Parameter l und m dienen hierbei zur Kalibrierung des Modells. Jedoch müssen diese Parameter abhängig vom jeweiligen Zustand der Fahrzeuge angepasst werden. So sind bei Hoefs [1972] zitiert nach Erlemann [2007] vier Zustände mit unterschiedlichen Parametersätzen definiert, welche von der Fahrsituation abhängig sind:

- Öffnen (Vergrößern der Weglücke)
- Schließen (Verkleinern der Weglücke mit Bremslicht)
- Schließen (Verkleinern der Weglücke ohne Bremslicht)
- Sonstige Fälle

Jedoch stößt dieses Modell schnell an seine Grenzen. So ist es beispielsweise zwingend erforderlich, dass ein führendes Fahrzeug n vorhanden ist, da ansonsten die nachfolgenden Fahrzeuge nie beschleunigen würden. Ebenfalls können bei Simulationen gewisse Situationen entstehen, in denen die Grenzen der physikalischen Möglichkeiten heutiger Fahrzeuge bei weitem überschritten werden

[Dallmeyer, 2014]. Stellt man die Einhaltung der maximalen Beschleunigungen (sowohl positiv als auch negativ) sicher, so treten in den Simulationen vermehrt Auffahrunfälle auf.

2.2.3 Gipps-Modell

Durch Treiber & Kesting [2010] wird das Gipps-Modell mit vereinfachten Ausdrücken (ohne jedoch das Grundkonzept zu verändern) wie folgt beschrieben:

Um einen Unfall zu vermeiden, wird in diesem Modell eine „sichere Geschwindigkeit“ $v_{safe}(\Delta x, v_n)$ berechnet, welche von dem folgenden Fahrzeug nicht überschritten werden darf. Ausgehend von folgenden Annahmen wurde die Formel (2-3) hergeleitet:

- Unter Berücksichtigung des „Worst Case Szenarios“ (welches in einer unerwarteten Vollbremsung der führenden FFE besteht) soll eine unfallfreie (Folge-) Fahrt gewährleistet werden. Somit soll trotz einer unvorhergesehenen Notbremsung (bis zum Stillstand) des führenden Fahrzeugs ein Minimalabstand x_0 eingehalten werden. → Es gibt gerade keine Berührung der Stoßstangen der betrachteten Fahrzeuge.³
- Bei den negativen Beschleunigungen (= Verzögerungen) tritt ein konstanter Wert auf. Die Höhe dieses Wertes entspricht der tatsächlich auftretenden maximalen Verzögerung der betrachteten Fahrzeuge in Notsituationen.
- Die Reaktionszeit wird durch einen konstanten Wert beschrieben.

$$\Delta x - x_0 \geq v_{n+1} \cdot T + \frac{v_{n+1}^2}{2b} - \frac{v_n^2}{2b} \quad (2-3)$$

b	Negative Beschleunigung (= Verzögerung)
T	Reaktionszeit
v_n	Geschwindigkeit des führenden Fahrzeugs
v_{n+1}	Geschwindigkeit des folgenden Fahrzeugs
x_0	Minimalabstand
Δx	Bruttoabstand zwischen den Fahrzeugen

Mit der Bedingung $v_{safe}(\Delta x, v_n) = v_{n+1}$ wird angenommen, dass sich das folgende Fahrzeug mit der sicheren Geschwindigkeit bewegt. Somit kann die sichere Geschwindigkeit über Lösen der quadratischen Gleichung wie folgt bestimmt werden:

$$v_{safe}(\Delta x, v_n) = -b \cdot T + \sqrt{b^2 \cdot T^2 + v_n^2 + 2 \cdot b \cdot (\Delta x - x_0)} \quad (2-4)$$

b	Negative Beschleunigung (= Verzögerung)
T	Reaktionszeit
v_n	Geschwindigkeit des führenden Fahrzeugs
v_{n+1}	Geschwindigkeit des folgenden Fahrzeugs
$v_{safe}(\Delta x, v_n)$	Sichere Geschwindigkeit bei Folgefahrten
x_0	Minimalabstand
Δx	Bruttoabstand zwischen den Fahrzeugen

³ Da bei Computersimulationen Diskretisierungsfehler nicht zu vermeiden sind, wurde diese Bedingung zu der Originalarbeit hinzugefügt.

Das Gipps-Modell besagt nun, dass die Geschwindigkeit zum Zeitpunkt $t + T$ wie folgt gewählt wird:

$$v(t + T) = \min \begin{cases} v_{n+1} + a_{n+1} \cdot T \\ v_0 \\ v_{safe}(\Delta x, v_n) \end{cases} \quad (2-5)$$

a_{n+1}	Beschleunigung des folgenden Fahrzeugs (sowohl positiv als auch negativ)
t	aktuell betrachteter Zeitpunkt
T	Reaktionszeit
$v(t + T)$	Geschwindigkeit zum Zeitpunkt $t + T$
v_0	Wunschgeschwindigkeit
v_{n+1}	Geschwindigkeit des folgenden Fahrzeugs
$v_{safe}(\Delta x, v_n)$	Sichere Geschwindigkeit bei Folgefahrt

Aus der Formel (2-5) erkennt man, dass das folgende Fahrzeug in den nachfolgenden Zeitschritten solange beschleunigt, bis entweder die sichere Geschwindigkeit oder die Wunschgeschwindigkeit erreicht wird. Sollte die Geschwindigkeit des folgenden Fahrzeugs über der sicheren Geschwindigkeit liegen, wird die Geschwindigkeit im nachfolgenden Zeitschritt über die Formel (2-6) verringert. Hierbei wird darauf hingewiesen, dass die negative Beschleunigung in diesem Falle nicht der negativen Beschleunigung aus der Formel (2-4) entsprechen muss. Bei geringfügiger Überschreitung der sicheren Geschwindigkeit, wie sie durch ein Verzögern des vorausfahrenden Fahrzeugs hervorgerufen werden kann, kann der Wert unter jenem von b liegen. Durch einen passiven Fahrstreifenwechsel (Einschernen eines anderen Fahrzeugs) kann die negative Beschleunigung jedoch auch Werte größer b annehmen. Ohne einen passiven Fahrstreifenwechsel eines dritten Fahrzeuges kann jedoch keine Situation entstehen in der $a_{n+1} > b$ gilt.

$$a_{n+1} = \frac{v_{n+1} - v_{safe}}{T} \quad (2-6)$$

a_{n+1}	Beschleunigung des nachfolgenden Fahrzeugs (sowohl Positiv als auch Negativ)
T	Reaktionszeit
v_{n+1}	Geschwindigkeit des nachfolgenden Fahrzeugs
v_{safe}	Sichere Geschwindigkeit bei Folgefahrt

2.2.4 Psycho-physisches Abstandsmodell

Die bisher beschriebenen Modelle gehen stets von der Annahme aus, dass ein folgendes Fahrzeug Informationen bezüglich einer Geschwindigkeitsänderung unmittelbar von seinem Vordermann erhält. Der Ansatz von Wiedemann [1974] reicht noch einen Schritt weiter und versucht, die Wahrnehmung des Fahrers in das Modell einfließen zu lassen.

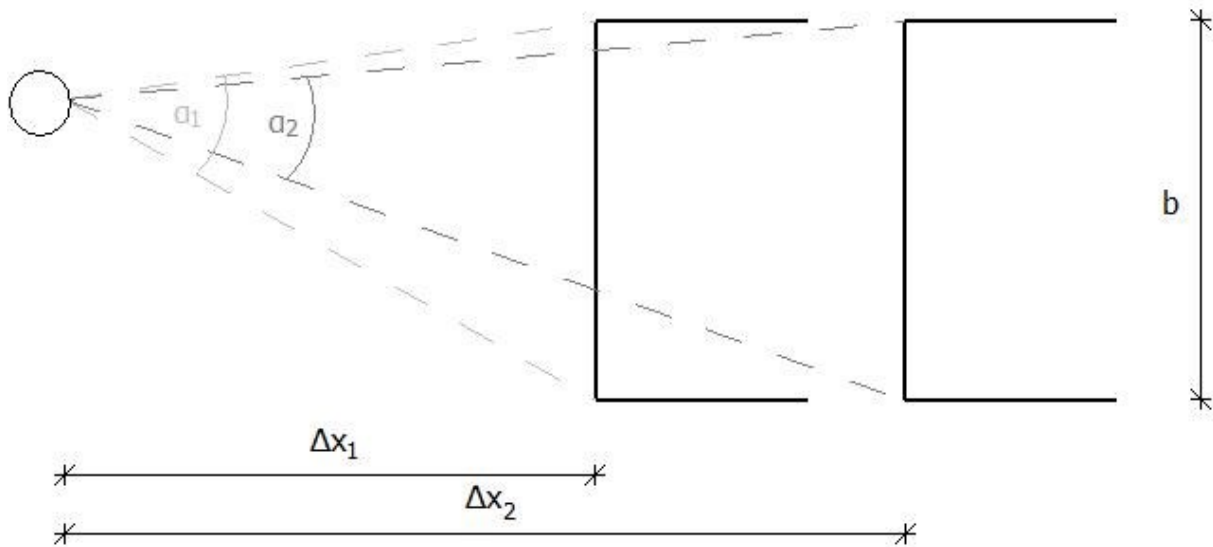


Abbildung 3 Schematische Darstellung der Wahrnehmung einer folgenden Fahrer-Fahrzeug-Einheit bei einer Folgefahrt [eigene Darstellung]

Treffen die Lichtstrahlen (in Abbildung 3 strichliert dargestellt) der äußeren Ränder eines führenden Fahrzeugs im Auge eines folgenden Fahrers ein, so spannen diese einen Winkel α auf. Gibt es nun eine Differenzgeschwindigkeit ungleich Null zwischen den beiden Fahrzeugen, so ändert sich deren Distanz Δx (siehe Abbildung 3). Da die Fahrzeugabmessungen (Breiten, Höhen und Längen) unverändert bleiben, hat diese Distanzänderung ebenfalls eine Änderung des Winkels α mit einer entsprechenden Winkelgeschwindigkeit zur Folge. Diese ergibt sich über:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{b \cdot \Delta v}{\Delta x^2} \quad (2-7)$$

- α Winkel zwischen den Lichtstrahlen der äußeren Ränder des führenden Fahrzeugs
- b Breite des führenden Fahrzeugs (Konstante)
- t Zeit
- Δv Differenzgeschwindigkeit der betrachteten Fahrzeuge
- Δx Abstand zwischen dem führenden Fahrzeug und dem Fahrer des folgenden Fahrzeugs

Möchte der Fahrer des folgenden Fahrzeugs die Distanz konstant halten, so muss er auf jede Winkelgeschwindigkeit ungleich Null reagieren. Das menschliche Auge kann jedoch nicht beliebig kleine Winkelgeschwindigkeiten wahrnehmen. Erst wenn gewisse Schwellwerte überschritten werden, kann bewusst auf diese Veränderungen reagiert werden. Im Zusammenhang damit ergeben sich im Wiedemann-Modell verschiedene Fahrbereiche, in denen sich eine Fahrzeug-Fahrer-Einheit (kurz: FFE) bei einer Folgefahrt befinden kann:

- Bereich des freien Fahrverhaltens
- Annäherungsbereich
- Folgebereich
- Bremsbereich
- (Kollisionsbereich)

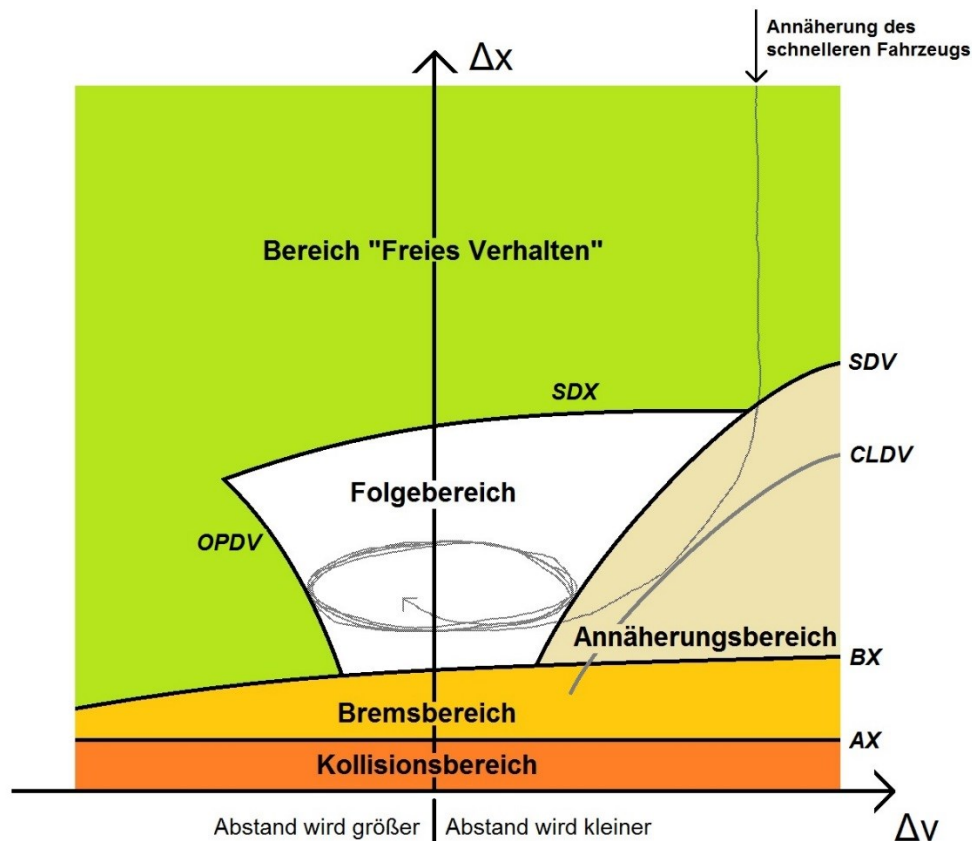


Abbildung 4 Psycho-physisches Fahrzeugfolgmodell nach Wiedemann [vgl. Wiedemann 1974]

- AX* Stillstandsabstand – gewünschte Abstand bei Stillstand
BX Sicherheitsabstand – gewünschter minimaler Folgeabstand
CLDV Wahrnehmungsschwelle – der Fahrer des folgenden Fahrzeugs bemerkt, dass das führende Fahrzeug langsamer unterwegs ist (bei kleinen Abständen)
OPDV Wahrnehmungsschwelle – der Fahrer des folgenden Fahrzeugs bemerkt, dass das führende Fahrzeug schneller unterwegs ist (bei kleinen Abständen)
SDV Wahrnehmungsschwelle – der Fahrer des folgenden Fahrzeugs bemerkt, dass das führende Fahrzeug langsamer unterwegs ist (bei großen Abständen)
SDX Wahrnehmungsschwelle der maximalen Folgedistanz

Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen schemenhaft, wie das Fahrzeugfolgmodell nach Wiedemann bei einer Annäherung einer FFE (hier: Pkw2) an eine langsamere FFE mit konstanter Geschwindigkeit (hier: Pkw1) abläuft. Dabei wird auf der Abszisse die Geschwindigkeitsdifferenz der beiden Fahrzeuge ($\Delta v = v_{Pkw2} - v_{Pkw1}$) aufgetragen und die Ordinate beinhaltet den Abstand der Fahrzeuge zueinander ($\Delta x = x_{Pkw1} - x_{Pkw2}$). (Vgl. Fellendorf & Vortisch [2010])

Anfangs fahren sowohl Pkw1 als auch Pkw2 konstant ihre jeweilige Wunschgeschwindigkeit. Pkw2 ist von Pkw1 so weit entfernt, dass das Fahrverhalten von Pkw1 keinen Einfluss auf Pkw2 nimmt. Da Pkw2 eine höhere Geschwindigkeit besitzt als Pkw1, ist die Differenzgeschwindigkeit größer 0 km/h und die Distanz zwischen den beiden Fahrzeugen nimmt, bis zum Erreichen der Wahrnehmungsschwelle SDV, kontinuierlich ab (siehe Abbildung 4).

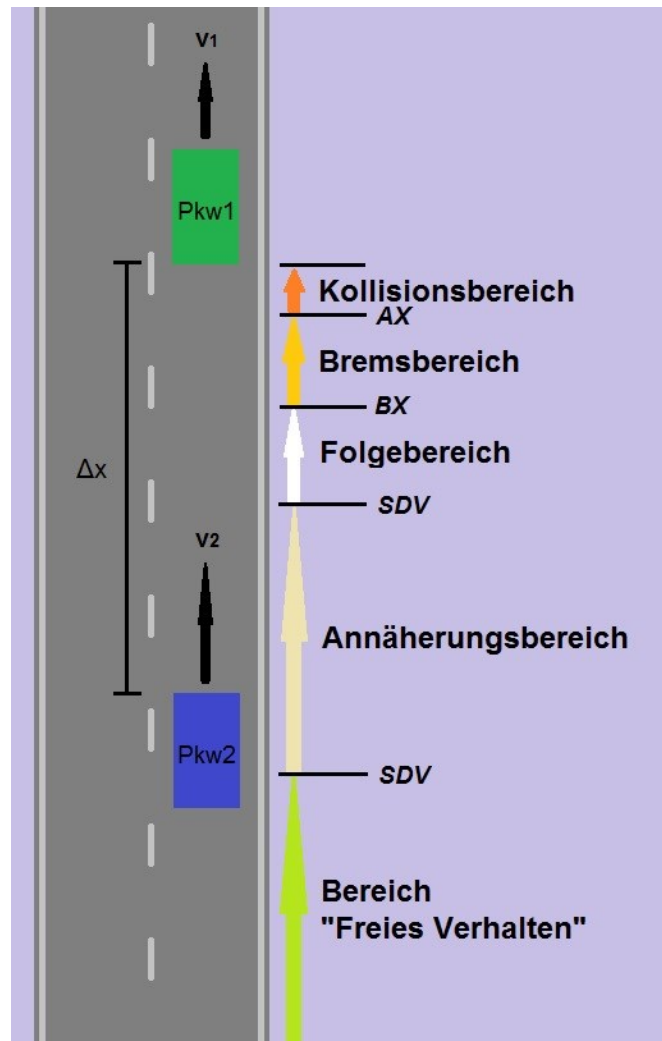


Abbildung 5 Bereiche bei Annäherung im Modell nach Wiedemann [eigene Darstellung]

Bei Überschreiten dieser Schwelle tritt Pkw2 in den Annäherungsbereich ein und die Fahrweise wird durch Pkw1 erstmalig beeinflusst. Im Annäherungsbereich beginnt Pkw2 mit einer Reduktion der Geschwindigkeit, wobei die Differenzgeschwindigkeit noch immer größer als 0 km/h ist. Somit verringert sich der Nettoabstand Δx weiterhin, jedoch bereits langsamer als im Bereich „Freies Verhalten“.

Nach dem erneuten Überschreiten der Wahrnehmungsschwelle SDV hat Pkw2 den gewünschten Folgeabstand erreicht und ist bestrebt diesen zu halten. Infolge der anfänglich beschriebenen Imperfektionen der menschlichen Wahrnehmung wird Pkw2 stets entweder unter die optimale Folgegeschwindigkeit ($\Delta v = 0$ km/h) verzögern oder darüber hinaus beschleunigen. Dies hat zur Folge, dass die Distanz stets zu- oder abnimmt. In Abbildung 4 wird diese Imperfektion durch eine Oszillation innerhalb des Folgebereiches sichtbar.

Pkw2 bleibt nun so lange im Folgebereich, bis eine externe Anregung (z.B. Überholwunsch durch Pkw2 o.Ä.) eine Änderung im Folgeverhalten hervorruft. So hat beispielsweise eine starke Verzögerung bei der Geschwindigkeit von Pkw1 einen Anstieg in der Differenzgeschwindigkeit zur Folge, welche zu einer Reduktion des Abstandes führt. Pkw2 tritt somit in den Bremsbereich ein und leitet ebenfalls eine Verzögerung ein. Verringert sich die Distanz auf einen Wert kleiner des Stillstandsabstands AX, so befindet sich Pkw2 im Kollisionsbereich. Bei einer unfallfreien Simulation sollte diese Situation jedoch nicht auftreten.

Das Folgeverhalten wurde im überarbeiteten Wiedemann-Modell aus dem Jahr 1999 durch zehn Parameter beschrieben (Vgl. PTV VISSIM 8 - Benutzerhandbuch):

- **CC0, Stillstandsabstand [m]:** Dieser Parameter beschreibt jenen Abstand zwischen den Fahrzeugen, welcher sich bei Stillstand (beim Halten der Fahrzeuge) einstellt. Er wird von allen Fahrzeugen (des entsprechenden Fahrzeugtyps) eingehalten und übt einen starken Einfluss auf die Rückstaulängen aus. Durch die direkte Beeinflussung der Verkehrsdichte hat dieser Parameter somit ebenfalls einen großen Einfluss auf das Ergebnis bei der Modellierung von Kreuzungen.
- **CC1, Folgeabstand [s]:** Der Folgeabstand ist ein konstanter Zeitwert, welcher eine geschwindigkeitsabhängige Distanz beschreibt, die eine FFE zum Vorderfahrzeug einhalten möchte. Niedrige Werte ($< 1,0$) stehen für eine aggressive/unvorsichtige Fahrweise wohingegen hohe Werte ($\sim 2,0$) auf ein vorsichtiges Fahrverhalten bei Folgefahrern schließen lassen.
- **CC2, Oszillation des Sicherheitsabstandes [m]:** Diese Länge kann sich ein vorausfahrendes Fahrzeug von der betrachteten FFE entfernen, bevor diese bewusst aufrückt. Die Oszillationslänge des Sicherheitsabstandes wird zum Sicherheitsabstand addiert.
- **CC3, Wahrnehmungsschwelle für Folgen [s]:** Über diesen Parameter wird jener Wert (in Sekunden) definiert, welcher den Beginn des Verzögerungsvorganges vor Erreichen des Sicherheitsabstandes darstellt. Er beschreibt also jenen Zeitpunkt vor dem Erreichen des Sicherheitsabstandes, bei dem eine FFE bei Annäherung an ein Objekt zu verzögern beginnt.
- **CC4 und CC5, Geschwindigkeitsdifferenzen bei Folgefahrern [m/s]:** Folgt die betrachtete FFE einem anderen Fahrzeug, reagiert sie erst auf Geschwindigkeitsunterschiede, deren Werte betragsmäßig höher sind als die in den Parametern angeführten Grenzen. Werden die Grenzen niedrig angesetzt (betragsmäßig geringe Werte), so führt dies zu einem empfindlicheren Fahrverhalten, in dem auf eine Geschwindigkeitsänderung früh reagiert wird. Der Parameter CC4 definiert den Grenzwert, bis zu welchem eine Verzögerung des Vorderfahrzeugs auftreten kann, ohne dass auf diese reagiert wird. Der Parameter CC5 beschreibt jenen Grenzwert, bis zu welchem eine Beschleunigung des Vorderfahrzeugs auftreten kann, ohne dass auf diese reagiert wird.
- **CC6, Geschwindigkeitsabhängigkeit der Oszillation [$1/(m*s)$]:** Wird dieser Wert auf 0 gesetzt, nimmt der Abstand keinen Einfluss auf die Oszillation bei Folgefahrern. Je größer dieser Wert wird, desto stärker schwankt die Geschwindigkeit bei zunehmendem Abstand.
- **CC7, Beschleunigung während der Oszillation [m/s^2]:** CC7 definiert, wie stark im Modus „Folgen“ unbewusst beschleunigt wird, um den Folgeabstand zu halten.
- **CC8, Wunschbeschleunigung aus dem Stillstand [m/s^2]:** Dieser Wert beschreibt, wie sehr eine FFE aus dem Stillstand beschleunigen möchte und stellt zusätzlich zu den fahrzeugspezifischen Maximalbeschleunigungen einen Grenzwert dar. Als tatsächliche Maximalbeschleunigung wird der kleinere der beiden Werte herangezogen.
- **CC9, Wunschbeschleunigung ab 80 km/h [m/s^2]:** Dieser Wert beschreibt, wie sehr eine FFE ab einer Geschwindigkeit größer 80 km/h beschleunigen möchte. Wie auch bei dem Parameter CC8 stellt der kleinere Wert von CC9 und der fahrzeugspezifischen Maximalbeschleunigung den tatsächlichen Beschleunigungswert der FFE dar.

2.3 Fahrstreifenwechsel in Mikrosimulationen

Im Gegensatz zum Longitudinalverhalten ist das laterale Fahrverhalten (auch Querverhalten sowie Fahrstreifenwechselerhalten genannt, umgangssprachlich auch Spurwechselerhalten) stark

situationsabhängig und kann eine Vielzahl an Eingangsgrößen beinhalten. Laut Trapp et al. [2006] stellt sich eine Abbildung in Formeln oder Diagrammen oftmals als schwierig dar, da „diese Modelle im Wesentlichen auf der Abfolge von logischen Verknüpfungen basieren.“ Allgemein gibt es bei verschiedenen Modellen zur Abbildung des Lateralverhaltens jedoch meist zumindest eine Stufe zur Überprüfung, ob der Wunsch, den Fahrstreifen zu wechseln, auftritt und zumindest eine zweite Stufe, welche überprüft, ob ein Fahrstreifenwechsel durchführbar ist.

Ein Wechselwunsch kann in zwei Kategorien eingeordnet werden:

- Freier Fahrstreifenwechsel
- Erforderlicher Fahrstreifenwechsel

Bei mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen und bei Überholvorgängen auf Straßen mit Gegenverkehr dient ein (freier) Fahrstreifenwechsel dem schnelleren Vorankommen. Erforderliche Fahrstreifenwechsel können entstehen, wenn ein Nichteinhalten des Fahrstreifenwechsels eine Abweichung von der geplanten Route zur Folge hätte. Dieser Fall kann beispielsweise bei Kreuzungen mit getrennten Abbiegestreifen oder bei Autobahnausfahrten auftreten.

2.3.1 Fahrstreifenwechselmodell nach Gipps

Werner [2010] beschreibt das Wechselmodell von Gipps folgendermaßen:

Vor dem Fahrstreifenwechsel werden drei Fragen geprüft:

1. Ist ein Fahrstreifenwechsel möglich?
2. Ist ein Fahrstreifenwechsel notwendig?
3. Ist ein Fahrstreifenwechsel wünschenswert?

Ad 1: In der Regel möchten Verkehrsteilnehmer Unfälle vermeiden. Aus diesem Grunde wird vor einem Fahrstreifenwechsel geprüft, ob durch den Wechsel ein anderer Verkehrsteilnehmer zu einer starken Verzögerung gezwungen wird und ob die Sicherheitsabstände sowohl zum Vorderfahrzeug als auch zum nachfolgenden Fahrzeug auf dem Zielfahrstreifen eingehalten werden. Die Parameter dieser Prüffunktionen können - abhängig von der Verkehrssituation (Verkehrsstärke in der näheren Umgebung, gefahrene Geschwindigkeiten etc.) und der persönlichen Einstellung des Fahrers - variieren.

Ad 2: Eine Überprüfung der Notwendigkeit eines Fahrstreifenwechsels tritt bei allen Knotenpunkten (Kreuzungen & Anschlussstellen in planfreien Straßennetzen) auf. Im Modell von Gipps werden die Bereiche vor den Knotenpunkten in drei Zonen aufgeteilt. Die erste Zone befindet sich so weit vom jeweiligen Knoten entfernt, dass mögliche Fahrstreifenwechsel in dieser Zone keinen Einfluss auf die gefahrene (geplante) Route im Knoten nehmen. Befindet sich eine FFE in der zweiten Zone, so werden Fahrstreifenwechsel lediglich dann durchgeführt, wenn diese dem Erreichen des Wunschfahrstreifens im Knoten dienlich sind. D.h. Fahrstreifenwechsel, welche sich von dem Zielfahrstreifen entfernen, werden vermieden. Erst in der dritten Zone (nahe dem Knoten) verliert die Wunschgeschwindigkeit an Bedeutung und die FFE versucht, den Wunschfahrstreifen umgehend zu erreichen - sofern sie sich nicht bereits darauf befindet.

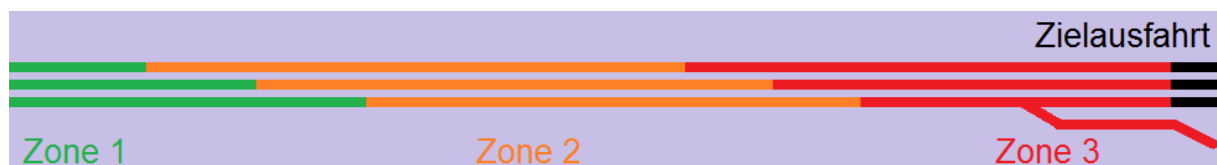


Abbildung 6 Schema der Zonen im Gipps-Modell zur Überprüfung, ob ein Fahrstreifenwechsel nötig ist [eigene Darstellung]

Ad 3: Aus dem Folgemodell ergeben sich die Folge- und Sicherheitsabstände zu Objekten vor der FFE. Diese Abstände versucht die FFE durch Adaption der gefahrenen Geschwindigkeit einzuhalten. Da jedoch eine jede FFE eine Wunschgeschwindigkeit (zugewiesen bekommen) hat, können sich daraus mitunter auch größere Abweichungen zwischen der gefahrenen Geschwindigkeit und der Wunschgeschwindigkeit ergeben. Aus diesem Grunde wird geprüft, ob die zu erwartende Geschwindigkeit auf dem Zielfahrstreifen näher an jener der eigenen Wunschgeschwindigkeit liegt. Zusätzlich berücksichtigt das Modell nach Gipps auch Fahrgemeinschaftsspuren. Diese Fahrgemeinschaftsspuren sind Fahrstreifen, welche nur von Fahrzeugen ab einem gewissen Besetzungsgrad (einer definierten Anzahl an Personen im Fahrzeug) befahren werden dürfen. Sie sind vor allem in den USA weit verbreitet und sollen die Bildung von Fahrgemeinschaften (vor allem zu den Hauptreisezeiten) anregen.

2.3.2 Fahrstreifenwechselmodell nach Sparmann

Im Modell für Fahrstreifenwechsel nach Sparmann [1978] befinden sich die FFEs während der Fahrt – ähnlich dem Folgemodell von Wiedemann [1974] – in unterschiedlichen Zuständen (unbeeinflusst, potenziell beeinflusst und aktuell beeinflusst). Zudem wird auf das Rechtsfahrgebot Rücksicht genommen. Dadurch ergibt sich die Notwendigkeit, in Fahrstreifenwechsel „nach links“ und „nach rechts“ zu unterscheiden. Besitzt die betrachtete FFE eine höhere Geschwindigkeit als eine vorausfahrende FFE auf demselben oder auf dem linken Fahrstreifen, so ergibt sich zuerst eine potentielle Beeinflussung (das bedeutet, dass die betrachtete FFE derzeit noch unbeeinflusst ist, jedoch Gefahr läuft in einem der folgenden Zeitschritte beeinflusst zu werden) und in weiterer Folge eine aktuelle Beeinflussung durch zumindest eines dieser Fahrzeuge. In diesem Fall entsteht ein Fahrstreifenwechselwunsch. Mit der Entstehung des Wechselwunsches wird zum einen eine Prüfung gestartet, ob ein Fahrstreifenwechsel eine Geschwindigkeitsverbesserung für die betrachtete FFE mit sich bringt. Zum anderen wird anschließend geprüft, ob ein Fahrstreifenwechsel möglich ist, ohne eine sicherheitskritische Reaktion bei einer der beteiligten FFEs hervorzurufen. Fallen nun beide Prüfungen positiv aus (Geschwindigkeitsverbesserung und Möglichkeit eines FS-Wechsels ohne sicherheitskritische Reaktionen hervorzurufen) wird die Entscheidung, einen Fahrstreifenwechsel zu machen, getroffen. Erst danach wird der Wechsel vollzogen. Dieser Entscheidungsprozess innerhalb des Fahrstreifenwechselwunsches läuft in einer definierten Zeitspanne ab. Dadurch wird einerseits die Möglichkeit geboten, einen Wechselwunsch wieder abzubauen, falls sich innerhalb dieser Entscheidungszeit Änderungen bezüglich der Beeinflussung ergeben (z.B. die vorausfahrende, einflussnehmende FFE erhöht die gefahrene Geschwindigkeit auf einen Wert über die Wunschgeschwindigkeit der betrachteten FFE). Andererseits verhindert dies einen sofort neu initiierten Fahrstreifenwechsel unmittelbar nach Abschluss des vorangegangenen Wechsels. Dies bedeutet jedoch auch, dass die Häufigkeit des Fahrstreifenwechsels über eine Variation dieser Zeit gesteuert werden kann. (Vgl. Erlemann [2007])

2.3.3 Fahrstreifenwechselverhalten in VISSIM

Im Fahrverhaltensmodell in VISSIM wird zwischen zwei Fahrstreifenwechseln unterschieden:

1. Freier Fahrstreifenwechsel
2. Nötige Fahrstreifenwechsel

Bei freien Fahrstreifenwechseln wird in VISSIM – ähnlich dem in Unterabschnitt 2.3.2 beschriebenen Fahrstreifenwechselmodell nach Sparmann [1978] – zuerst überprüft, ob die jeweilige FFE einen Wechselwunsch aufweist. Dieser Fall tritt lediglich in Situationen auf, in denen die entsprechende

FFE sich nicht in dem von Wiedemann [1974] definierten Bereich des „freien Verhaltens“ befindet. Sofern sich die Fahrbedingungen auf einem benachbarten Fahrstreifen als besser erweisen (z.B. geringere Beeinflussung durch ein vorausfahrendes Fahrzeug) wird überprüft, ob ein Fahrstreifenwechsel möglich ist. Notwendige Fahrstreifenwechsel treten in jenen Situationen auf, in welchen die Einhaltung einer Route zu einem Fahrstreifenwechsel führt. Zu einem solchen Routenverlauf kommt es etwa bei Abfahrten im hochrangigen Straßennetz. Im Gegensatz zum freien Fahrstreifenwechsel werden beim notwendigen Fahrstreifenwechsel zwei zusätzliche Distanzen berücksichtigt: eine Distanz bis zum Erreichen des jeweiligen richtungsgebundenen Fahrstreifens und eine sogenannte „Nothalteposition“. Diese Nothalteposition wird über den Abstand zur Verbindungsstrecke definiert, bei welchem eine FFE stehen bleibt, falls sie sich nicht in den Verkehrsfluss auf dem entsprechenden Fahrstreifen einordnen konnte. In beiden Situationen (freier und notwendiger Fahrstreifenwechsel) akzeptiert die FFE, dass durch ihren Fahrstreifenwechsel die nachfolgende FFE auf dem Zielfahrstreifen zu einer Geschwindigkeitsreduktion gezwungen wird. Im Falle eines notwendigen Fahrstreifenwechsels steigt die akzeptierte Geschwindigkeitsreduktion der nachfolgenden FFE des Zielfahrstreifens, je mehr sich die fahrstreifenwechselnde FFE der Nothalteposition annähert. (Vgl. Fellendorf und Vortisch [2010])

Um den Verkehrsfluss bei hohen Verkehrsstärken möglichst realitätsnahe modellieren zu können, wurde in VISSIM zusätzlich die Funktion „kooperatives Fahren“ implementiert. Dadurch wird bei einem Fahrstreifenwechsel das Longitudinalverhalten der entsprechenden FFE beeinflusst. So passt die FFE mit Wechselwunsch zunächst ihre Geschwindigkeit an die durchschnittliche Geschwindigkeit auf dem Zielfahrstreifen an. Nähert sich die FFE mit Wechselwunsch dem Punkt, an dem der Fahrstreifenwechsel abgeschlossen sein muss, so reduziert sie die Geschwindigkeit weiter, um eine Lücke auf dem Zielfahrstreifen zu finden. Zusätzlich bekommen die FFEs auf dem Zielfahrstreifen die Information, dass sich eine FFE von einem benachbarten Fahrstreifen auf dem Zielfahrstreifen einordnen möchte. Um diesen Wechsel zu ermöglichen, wird mit einer benutzerdefinierten Verzögerung die Lücke offen gehalten oder sogar vergrößert. Damit der Verkehrsstrom jedoch nicht infolge des kooperativen Verhaltens zusammenbricht, wird die kooperative Geschwindigkeitsreduktion von einer FFE nur einmal innerhalb einer definierbaren Distanz durchgeführt. (Vgl. Fellendorf und Vortisch [2010])

2.4 Fahrdynamische Kenngrößen

In der Fahrzeugtechnik beschreibt der Begriff „Fahrdynamik“ alle Bewegungen (sowohl Translation als auch Rotation) eines Fahrzeugs entlang der drei Raumachsen (Längsachse, Querachse und Hochachse) Heißing et al. [2011]. Im Verkehrsingenieurwesen werden mit den „fahrdynamischen Kenngrößen“ Kennwerte von Fahrten ermittelt, welche Aufschluss über das Fahrverhalten der Fahrer liefern. Dabei nehmen eine Vielzahl an äußeren Rahmenbedingungen Einfluss auf die fahrdynamischen Kenngrößen einer FFE. Beispielsweise treten in Städten Anfahrprozesse häufiger auf als im ländlichen Umfeld, da ein dichteres Netz an Kreuzungen und Verkehrslichtsignalanlagen vorzufinden ist. Autobahnen bieten aufgrund verschiedener baulicher Maßnahmen eine gute Möglichkeit, hohe durchschnittliche Geschwindigkeiten zu erreichen, sofern die Verkehrsauslastung diesen nicht entgegenwirkt. Werden die äußeren Rahmenbedingungen allerdings konstant gehalten, so können anhand der fahrdynamischen Kenngrößen unter Umständen Abweichungen im Fahrverhalten festgestellt werden. Da im Zuge dieser Arbeit die Auswirkungen von automatisierten Fahrzeugen auf das Fahrverhalten von Personen untersucht werden soll, wird in den nachfolgenden Unterabschnitten die Ermittlung relevanter, fahrdynamischer Kenngrößen erläutert.

2.4.1 Fahrdauer

Die Fahrdauer beschreibt (in dieser Arbeit) jene Zeitspanne, innerhalb welcher eine Auswertung der Fahrverhalten stattfindet. Dabei kann sowohl für den Start als auch für das Ende der Auswertungsdauer eine eigene Definition für die Abgrenzung aufgestellt werden. Die Ermittlung der Fahrdauer erfolgt über folgende Formel:

$$t_{traveltime} = t_{Ende} - t_{Start} \quad (2-8)$$

t_{Ende} Simulationssekunde, bei der die Auswertungen der fahrdynamischen Kenngrößen enden sollen

t_{Start} Simulationssekunde, bei der die Auswertungen der fahrdynamischen Kenngrößen starten sollen

$t_{traveltime}$ Reisezeit, welche für das Durchfahren der simulierten Autobahnstrecke benötigt wird

2.4.2 Durchschnittliche Geschwindigkeit

Die durchschnittliche Geschwindigkeit wird über die Fahrdauer und die zurückgelegte Wegestrecke innerhalb der Fahrdauer ermittelt.

$$v_{avg} = \frac{s_{cons}}{t_{traveltime}} \quad (2-9)$$

v_{avg} durchschnittliche Geschwindigkeit

s_{cons} zurückgelegte Wegestrecke (hier: Strecke zwischen den Positionen zu den Zeitpunkten t_{Start} und t_{Ende})

$t_{traveltime}$ Fahrdauer

2.4.3 Durchschnittliche positive Beschleunigung

Hohe durchschnittliche Beschleunigungen entstehen bei längeren Fahrstrecken, wenn der Fahrer eines Fahrzeugs häufig stark beschleunigt. Die Gründe für hohe Beschleunigungen können allerdings vielfältig sein. Da vor allem bei niedrigen Geschwindigkeiten häufig hohe Beschleunigungen durchgeführt werden, weisen hohe durchschnittliche Beschleunigungswerte auf vermehrte Anfahrprozesse hin. Dabei kann eine Häufung dieser Anfahrprozesse beispielsweise in gestauten Bereichen oder bei sehr aggressiver Fahrweise auftreten. Aus letzterem Grund wurde die Ermittlung der durchschnittlichen positiven Beschleunigung als ein mögliches Indiz für eine Fahrverhaltensänderung in den nachfolgenden Analysen aufgenommen.

Die Berechnung der durchschnittlichen positiven Beschleunigung erfolgt, bei diskreten Messungen, über folgende Formel:

$$a_{pos,avg} = \frac{1}{n_{a^+}} \sum_{i=1}^{n_{a^+}} a_i^+ \quad (2-10)$$

$a_{pos,avg}$ durchschnittliche positive Beschleunigung

a^+ positive Beschleunigung

n_{a^+} Anzahl der positiven Beschleunigungen (bei diskreten Messungen)

Hierbei ergibt sich a_i aus folgender Formel:

$$a_i^+ = \frac{v_{i+1} - v_i}{\Delta t}, \quad (v_{i+1} - v_i) > 0 \quad (2-11)$$

v_{i+1} Geschwindigkeit zum Zeitpunkt $i + 1$ Zeitschritt

v_i Geschwindigkeit zum Zeitpunkt i

Δt Dauer des Zeitschritts

2.4.4 Durchschnittliche negative Beschleunigung

Ähnlich der durchschnittlichen positiven Beschleunigung ist, auf längeren Fahrstrecken, ein Anstieg des Betrags der durchschnittlichen negativen Beschleunigung nur bei vermehrten starken Bremsmanövern zu erwarten. Speziell bei häufigen „Notsituationen“ steigt der Betrag der durchschnittlichen negativen Beschleunigung an. Eine Ermittlung der durchschnittlichen negativen Beschleunigung erfolgt in gleicher Weise wie jene der durchschnittlichen positiven Beschleunigung.

$$a_{neg,avg} = \frac{1}{n_{a^-}} \sum_{i=1}^{n_{a^-}} a_i^- \quad (2-12)$$

$a_{neg,avg}$ durchschnittliche negative Beschleunigung

a^- negative Beschleunigung

n_{a^-} Anzahl der negativen Beschleunigungen (bei diskreten Messungen)

Hierbei ergibt sich a_i aus folgender Formel:

$$a_i^- = \frac{v_{i+1} - v_i}{\Delta t}, \quad (v_{i+1} - v_i) < 0 \quad (2-13)$$

v_{i+1} Geschwindigkeit zum Zeitpunkt $i + 1$ Zeitschritt

v_i Geschwindigkeit zum Zeitpunkt i

Δt Dauer des Zeitschritts

2.4.5 Median der negativen Beschleunigung

Der Median der negativen Beschleunigung soll als zusätzliches Merkmal für die Beurteilung des Fahrverhalten bzw. für eine Analyse der Fahrverhaltensveränderung herangezogen werden. Da der Median von „Ausreißern“ nicht so sehr beeinflusst wird wie das arithmetische Mittel, wurde für die Beurteilung der negativen Beschleunigung zusätzlich der Medianwert erhoben. Als Median wird jener Wert bezeichnet, bei dem 50% der Ergebnisse über dem Wert und 50% der Ergebnisse unter diesem Wert liegen.

$$a_{neg,med} = \begin{cases} \frac{a_{\frac{n}{2}+1}^-}{2} & \text{für } n \text{ ungerade} \\ \frac{1}{2} \left(a_{\frac{n}{2}}^- + a_{\frac{n}{2}+1}^- \right) & \text{für } n \text{ gerade} \end{cases} \quad (2-14)$$

$a_{neg,med}$ Median der negativen Beschleunigung

a^-	negative Beschleunigungswert
n	Anzahl der Werte

2.4.6 maximale negative Beschleunigung

In Notsituationen treten bei einer „Vollbremsung“ üblicherweise Verzögerungen (negative Beschleunigungen) bis ca. 8 m/s² auf. Bei hervorragenden Bedingungen (gute Haftung der Reifen am Asphalt und gutes Bremssystem) kann ein Pkw Verzögerungen von bis zu 10 m/s² erreichen (Vgl. Breuer & Bill [2017]). Der Übergang zwischen einer starken Bremsung und einer Notbremsung ist allerdings fließend.

2.4.7 Standardabweichung der Beschleunigung (Beschleunigungsrauschen)

Das Beschleunigungsrauschen (englisch: acceleration noise) stellt die Standardabweichung der Beschleunigung eines Fahrzeugs in einem Verkehrsstrom dar. Je öfter und stärker ein Fahrzeug beschleunigt oder verzögert, desto höher wird der Wert des Beschleunigungsrauschens. Je gleichmäßiger ein Fahrzeug fährt, desto geringer wird dieser Wert. Es ist davon auszugehen, dass eine aggressive Fahrweise ein höheres Beschleunigungsrauschen verursacht. Dabei können jedoch auch andere Einflüsse zu einem erhöhten Beschleunigungsrauschen beitragen, wodurch dieser Wert ebenfalls nur als ein Indiz auf eine Fahrverhaltensveränderung anzusehen ist. Die Ermittlung erfolgt über folgende Formel:

$$S_{accNoise} = \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum (a_i - a_{mittel})^2} \quad (2-15)$$

$S_{accNoise}$	Standardabweichung der Beschleunigung (Beschleunigungsrauschen)
a_i	jeweiliger Beschleunigungswert
a_{mittel}	Mittelwert aller Beschleunigungen
τ	Fahrdauer

2.5 Zeit bis zur Kollision (ttc)

Üblicherweise wird bei zeitlichen Abständen zwischen zwei Fahrzeugen von Folgeabständen und Sicherheitsabständen gesprochen. Dabei werden diese über die Distanz zwischen den beiden Fahrzeugen und der Geschwindigkeit eines der beiden Fahrzeuge definiert. Die „Zeit bis zur Kollision“ (englisch: time to collision, kurz: ttc) ist eine Zeitspanne, welche nur im Falle einer Annäherung zweier Objekte bestimmt werden kann. Dabei entspricht sie eben jener Zeitspanne, nach welcher – ohne Geschwindigkeitsanpassungen vorzunehmen – eine Kollision erfolgen würde.

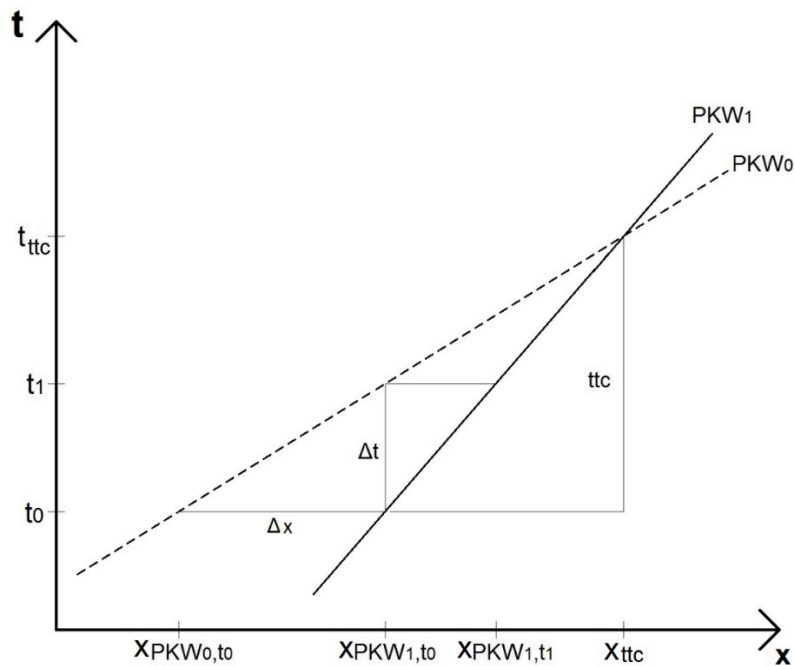


Abbildung 7 Schema "time to collision" [eigene Darstellung]

Abbildung 7 zeigt schemenhaft zwei Fahrzeuge, welche sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten in die selbe Richtung bewegen. Dabei besitzt PKW₀ eine höhere Geschwindigkeit (Neigung der Trajektorie ist flacher) als PKW₁ (Neigung der Trajektorie ist steiler). Zum Zeitpunkt t_0 definiert sich die Distanz der beiden Fahrzeuge (Δx) aus deren momentanen Positionen ($x_{PKW_1,t_0} - x_{PKW_0,t_0}$). Der zeitliche Folgeabstand (in Abbildung 7 als Δt bezeichnet) ergibt sich aus der Zeitspanne, welche PKW₀ benötigt, um die Position von PKW₁ zur Zeit t_0 ($= x_{PKW_1,t_0}$) zu erreichen. Er errechnet sich aus $\Delta x/v_{PKW_0}$. Der Zeitpunkt, an dem PKW₀ an der Stelle von PKW₁ im Zeitpunkt t_0 war, ergibt sich aus $t_1 = t_0 + \Delta t$. Allerdings hat sich in der Zeitspanne Δt PKW₁ ebenfalls weiterbewegt und befindet sich zum Zeitpunkt t_1 an der Position x_{PKW_1,t_1} . PKW₀ hat PKW₁ zu dieser Zeit noch nicht erreicht. Erst zum Zeitpunkt t_{ttc} befinden sich beide PKWs auf der selben Position. Ausgehend von dem Zeitpunkt t_0 errechnet sich die Zeitspanne bis zu einer möglichen Kollision (ttc) aus der Distanz Δx zum Zeitpunkt t_0 und der Geschwindigkeitsdifferenz der beiden Fahrzeuge über die nachfolgende Formel:

$$ttc = \frac{\Delta x}{(v_{PKW_0} - v_{PKW_1})} \quad (2-16)$$

- ttc Zeit bis zur Kollision
- Δx Distanz der beiden Fahrzeuge zum Zeitpunkt t_0
- v_{PKW_0} Geschwindigkeit des schnelleren hinteren Fahrzeugs
- v_{PKW_1} Geschwindigkeit des langsameren vorderen Fahrzeugs

3 Aufbau der Simulationsumgebung

Im Rahmen dieser Arbeit sollen etwaige Änderungen im menschlichen Fahrverhalten bei Interaktionen mit automatisiert fahrenden Fahrzeugen untersucht werden. Dabei wird sowohl das subjektive Befinden berücksichtigt, als auch Änderungen in objektiv messbaren Kenngrößen analysiert. Hierfür sind Interaktionen zwischen natürlichen Fahrern (Menschen) mit sowohl automatisierten Fahrzeugen als auch mit nicht-automatisierten Fahrzeugen nötig, um Vergleichswerte zu erhalten. Eine gleichzeitige Erhebung der Fahrzustände von mehreren Fahrzeugen ist in Feldmessungen allerdings - wenn überhaupt - nur eingeschränkt realisierbar und zudem mit einem hohen Aufwand verbunden. Durch Fahrstudien können jedoch selbst jene Daten in einer kontrollierten Umgebung gemessen und (erforderlichenfalls) wiederholt werden, welche in Feldmessungen nur eine eingeschränkte Wiederholbarkeit aufweisen (vgl. Lange et al. [2017]). Aus diesem Grunde wurde im Rahmen dieser Masterarbeit eine Fahrstudie durchgeführt. An der Vorbereitung und Durchführung der Simulatorstudie haben die in Abbildung 8 angeführten Organisationen mitgewirkt.



Abbildung 8 Beteiligte Organisationen bei der Vorbereitung und Durchführung der Fahrstudie [eigene Darstellung]

Das Institut für Fahrzeugtechnik (FTG) der Technischen Universität Graz stellte die Räumlichkeiten und den Fahrstudien (FASI) mitsamt der technischen Betreuung für die Studie zur Verfügung. Zusätzlich wurden die Organisation und Abstimmung mit den Probanden durch das FTG abgewickelt. Für die visuelle Gestaltung der Simulationsumgebung sorgte die Fraunhofer Austria Research GmbH. Neben der dreistreifigen Fahrbahn (+ zusätzlichen Pannestreifen) wurden eine Hügellandschaft, querende Brücken, Betonleitwände, Lärmschutzwände und ein Tunnel am Ende der Strecke modelliert. Die Erstellung der automatisierten Fahrverhaltensmodelle, welche über eine Schnittstelle in die VISSIM-Modelle eingelesen wurden, wurde von der „Kompetenzzentrum – Das virtuelle Fahrzeug, Forschungsgesellschaft mbH“ übernommen. An dieser Stelle soll jedoch zusätzlich auf das Simulationsprogramm und das (im Rahmen dieser Masterarbeit am Institut für Straßen- und

Verkehrswesen erstellte) Verkehrsflussmodell an sich eingegangen werden, welches die Basis für die Simulation des Verkehrsgeschehens darstellt.

3.1 Verkehrsflussmodell

In einem (mikroskopischen) Verkehrsflussmodell reagieren die Fahrzeuge auf die sie umgebenden anderen Fahrzeuge. Ein solches Modell ist somit der ideale Ansatz für eine Fahrstudie, da nach dem Einfügen eines virtuellen Ego-Fahrzeugs alle anderen Fahrzeuge bereits auf dieses reagieren. Probanden haben somit nicht die Anforderung, exakte Fahrbefehle (wie zum Beispiel: „Bei der nächsten Gelegenheit wechseln Sie auf den mittleren Fahrstreifen!“) ausführen zu müssen, sondern können sich innerhalb eines eingeschränkten Bereichs frei bewegen. Dieser Abschnitt beschreibt somit die Erstellung des Verkehrsflussmodells mit dem Programm VISSIM 8 der „PTV Planung Transport Verkehr AG“. Hierbei soll als erstes im Unterabschnitt 3.1.1 das Programm an sich erläutert werden.

3.1.1 VISSIM

VISSIM setzt zur Modellbildung des Longitudinalverhaltens auf das psycho-physische Folgemodell von Wiedemann (siehe Unterabschnitt 2.2.4) und als Basis des Lateralverhaltens auf jenes von Sparmann (siehe Unterabschnitt 2.3.2). Mit den Parametern dieser beiden Modellansätze kann das menschliche Fahrverhalten sehr feinstufig an lokal beobachtete Fahrverhalten angepasst werden. Ebenfalls kann, ein zu erwartendes Fahrverhalten von autonom fahrenden Fahrzeugen abgebildet werden (vgl. Sukennik et al. [2017]). Eine einfache Art der Nachbildung des autonomen Fahrverhaltens besteht in der Anpassung der CC-Parameter in dem Wiedemann 99 Modell. VISSIM bietet jedoch auch die Gelegenheit, über eine COM-Schnittstelle oder über die DriverModel API auf das Fahrverhalten der erzeugten VISSIM-Fahrzeuge Einfluss zu nehmen. Durch die DriverModel API kann das Fahrverhalten aller VISSIM-Fahrzeuge (oder auch nur eines Teils) über ein externes Fahrmodell gesteuert werden. Dabei fordert VISSIM in jedem Simulationsschritt die Beschleunigungen und das Fahrstreifenwechselverhalten aus einer DLL-Datei an. Ähnlich dazu kann beispielsweise ein einzelnes Fahrzeug (nachfolgend wird dieses Fahrzeug „Ego-Fahrzeug“ genannt) in dem VISSIM-Modell durch einen Fahrstudie gesteuert werden. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, tatsächliches menschliches Fahrverhalten in einem VISSIM-Modell aufzuzeichnen und gemeinsam mit den Daten der anderen VISSIM-Fahrzeuge auszuwerten. In einer frei konfigurierbaren Ausgabedatei mit der Endung *.fzp („fzp“ steht für „Fahrzeugprotokoll“) können neben dem Ort eines Fahrzeugs zu jedem Zeitpunkt auch sein Fahrzustand und die Abstände zu benachbarten Fahrzeugen aufgezeichnet werden. Dabei sind vor dem Start der Simulation die aufzuzeichnenden Fahrzeugtypen auszuwählen. Ein Fahrzeugtyp fasst in VISSIM alle Fahrzeuge zusammen, welche gleichartige technische Fahreigenschaften aufweisen (Vgl. VISSIM 8 – Benutzerhandbuch). VISSIM ermöglicht ebenfalls eine benutzerdefinierte Anpassung der im Fahrzeugprotokoll aufzuzeichnenden Daten, wodurch die Größe des Protokolls (abhängig von der Aufzeichnungsfrequenz und -dauer, sowie der Anzahl an Fahrzeugen in der Simulation) stark reduziert werden kann. Dabei sollte jedoch darauf geachtet werden, dass die grundlegendsten Daten (wie zum Beispiel die Simulationssekunde, in welcher die Daten aufgezeichnet werden oder die eindeutige Fahrzeug-Identifikationsnummer) stets mitprotokolliert werden. In Tabelle 1 sind die Parameter, welche im Zuge der Auswertungen herangezogen wurden, aufgelistet.

Tabelle 1 Die wichtigsten Parameter aus der *.fzp-Datei

Parameter	Bezeichnung	Beschreibung
Simulationssekunde	simsec	Einzelne diskrete Zeitschritte, für welche die Fahrzustände, Positionen und weitere Parameter berechnet und protokolliert werden (können)
Fahrzeug-ID	ID	Individuelle Fahrzeug-Identifikationsnummer der einzelnen Fahrzeuge
Fahrzeug-Typ	vehtype	Fahrzeuge mit gleichartigen technischen Fahreigenschaften (z.B. Lkw, Pkw, etc.)
Streckenummer	roadway	Fortlaufende eindeutige Nummerierung der modellierten Strecken (kann benutzerspezifisch angepasst werden)
Fahrstreifennummer	line	Nummerierung der einzelnen Fahrstreifen einer Richtungsfahrbahn, wobei die Nummerierung von links nach rechts (in Zeichenrichtung) abnimmt.
Fahrzustand	drivState	Dieser ist davon abhängig, ob ein Fahrzeug durch ein anderes (oder mehrere andere) Fahrzeug(e) beeinflusst wird. Es werden folgende Fahrzustände der VISSIM-Fahrzeuge unterschieden: <ul style="list-style-type: none"> • Brakes cooperatively = Kooperatives Bremsen • Brakes for lane change = Bremsen für Fahrstreifenwechsel • Brakes hard = Starkes Bremsen • Brakes moderately = Gemäßigtes Bremsen • Changing lane = Fahrstreifenwechsel • Default = Standard • Has changed lane = Hat den Fahrstreifen gewechselt • Wants to change lane = Will den Fahrstreifen wechseln
Fahrstreifenwechsel	line_chg	Richtung des aktuellen Fahrstreifenwechsels
Position	pos	Entfernung auf der Strecke vom Beginn der aktuellen Strecke
Beschleunigung	acc	Aktuelle Beschleunigung während des Zeitschritts
Geschwindigkeit	speed	Geschwindigkeit am Ende des Zeitschritts
Fahrzeuglänge	vehlength	Längsabmessung des Fahrzeugs

Für das Ego-Fahrzeug konnten jedoch weder der Fahrzustand, noch der Fahrstreifenwechsel oder die Beschleunigung im Fahrzeugprotokoll aufgezeichnet werden. Aus diesem Grunde wurden die Beschleunigungen und die Zeitpunkte vom Aufkommen eines Fahrstreifenwechselwunsches und dem Entscheid zu einem Fahrstreifenwechsel, wie in Kapitel 5 beschrieben, näherungsweise ermittelt.

Als Aufzeichnungsfrequenz dieser Daten wurde in VISSIM die maximale Berechnungsrate von 20 Simulationsschritten je Sekunde gewählt, da eine Einspeisung der Fahrzeugpositionen in den Fahr Simulator eine hohe Frequenz für eine flüssige Bildwiedergabe benötigt.

3.1.2 Streckenaufbau

In der durchgeführten Simulatorstudie bildete eine rund 14 km lange, dreistreifige Richtungsfahrbahn mit einer Steigung von 0% und fünf Knotenpunkten entlang der Strecke das Grundsystem. Dabei wurden jedoch nur ca. 13 km der Strecke von den Probanden im Fahrsimulator befahren (siehe Abbildung 9). Entsprechend der Straßenverkehrsordnung 1960 galt für den simulierten Streckenabschnitt eine höchstzulässige Geschwindigkeit von 130 km/h. Der erste Teil) zu Beginn der Strecke (Länge = ca. 400 m) wurde genützt, um die von VISSIM generierten Fahrzeuge hinter einer Kurve in das Modell fließen zu lassen. Dadurch sollte vermieden werden, dass die Fahrzeuge vor den Augen des Probanden in die Simulation gesetzt werden. Die restliche Strecke wurde als eine Gerade modelliert, um etwaige Einflüsse infolge von Kurvigkeit auszuschließen.

An den ersten drei Knoten in Fahrtrichtung wurde jeweils zuerst eine Ausfahrt gefolgt von einer Einfahrt angeordnet, um einfache Ein- / Ausfädungssituationen zu erhalten. Knoten 4 und 5 wurden als Verflechtungsstrecken (Einfahrt vor Ausfahrt) konzipiert.

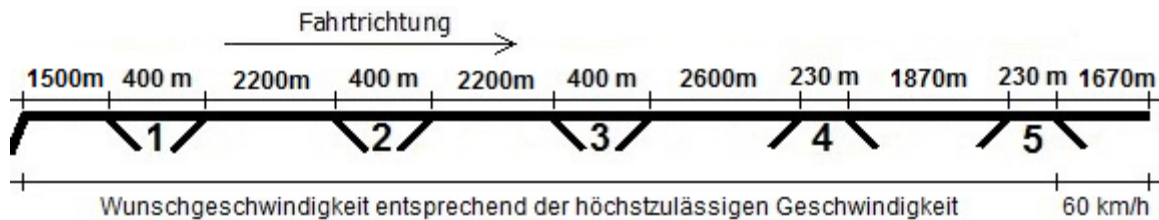


Abbildung 9 Schematische Darstellung der Fahrstrecke [eigene Darstellung]

Die Abmessungen der Ein- und Ausfädelungsstrecken, sowie der Verflechtungsstrecken orientierten sich an der RVS 03.05.13. Dabei wurden Fahrbahnbreiten von 3,50 Meter für den linken Fahrstreifen und 3,75 Meter für den mittleren und den rechten Fahrstreifen gewählt. Sowohl die Breite des Beschleunigungsstreifens (b_{MR}) als auch des Verzögerungsstreifens (b_{VR}) wurde mit 4,00 Meter modelliert. Mit dem in der RVS 03.05.13 vorgeschlagenen Verziehungsverhältnis von 1:20 ergab sich jeweils eine Länge von 80 Metern, welche für die Fahrstreifenwechselstrecken (L_{WR}) und die Verziehungsstrecken (L_{ZR}) vorgesehen waren. Die Breiten der Ein- und Ausfahrstreifen (b_R) sind mit 4,50 Metern in das Modell eingegangen. Diese Breiten waren jedoch für das restliche Modell unerheblich, da sie im FASI für die Probanden nicht sichtbar waren und im Verkehrsflussmodell mit einem Fahrstreifen keinen Spurwechsel erlaubten.

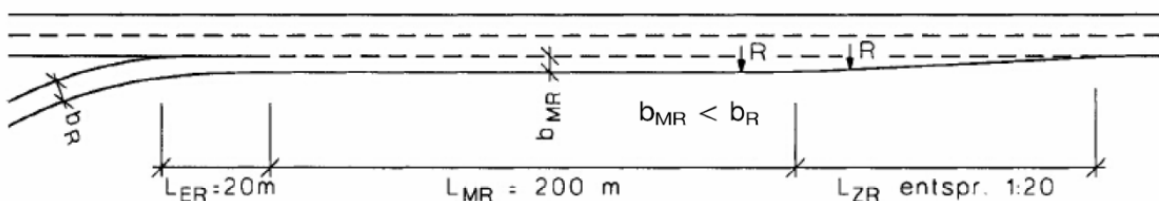


Abbildung 10 Einstreifige Einfahrt mit Rechtsabbiegestreifen laut RVS 03.05.13

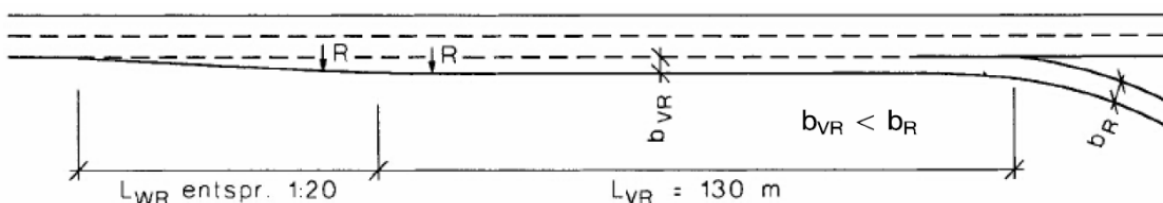


Abbildung 11 Einstreifige Ausfahrt mit Rechtsabbiegestreifen laut RVS 03.05.13

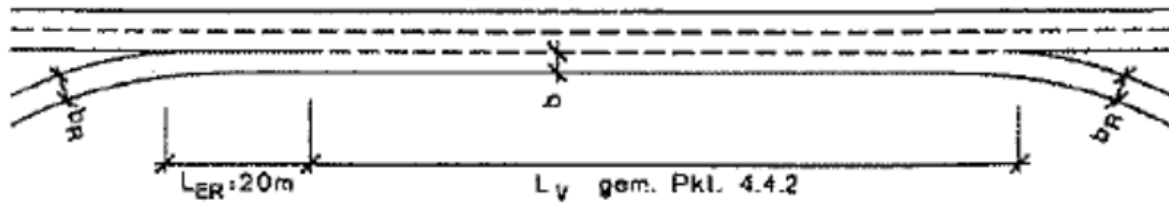


Abbildung 12 Verflechtungsstrecke laut RVS 03.05.13

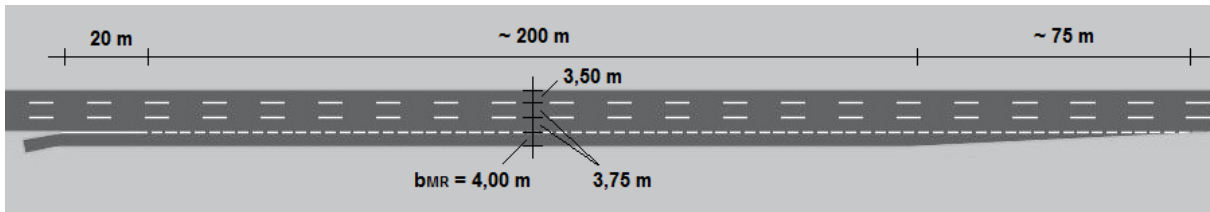


Abbildung 13 Schematische Darstellung der Beschleunigungsstreifen bei Einfahrt 1, 2 und 3 im FASI [eigene Darstellung]

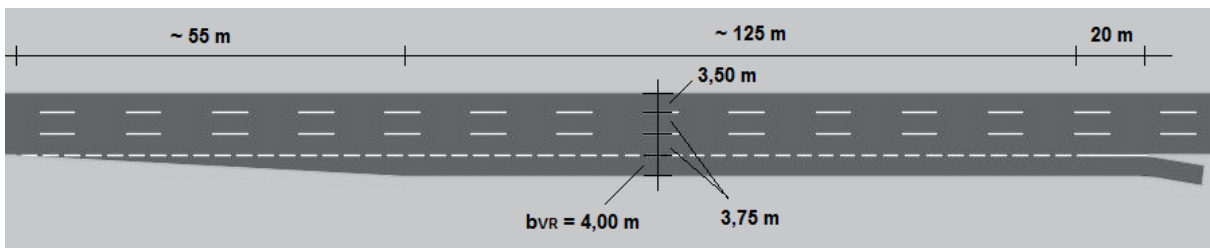


Abbildung 14 Schematische Darstellung des Verzögerungsstreifens bei Ausfahrt 1, 2 und 3 im FASI [eigene Darstellung]

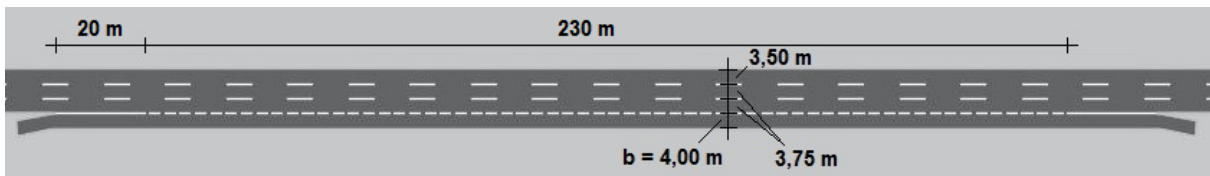


Abbildung 15 Schematische Darstellung der Verflechtungsstrecke bei Ausfahrt 4 und 5 im FASI [eigene Darstellung]

In der grafischen FASI-Simulation wurden die in Abbildung 13, Abbildung 14 und Abbildung 15 dargestellten Abmessungen umgesetzt. Bei den Längen der Beschleunigungs-, Verzögerungs- und Verziehungsstrecken ergaben sich aufgrund der finalen Anpassung des VISSIM Modells an das grafische Modell, welches im Fahr Simulator wiedergegeben wurde, kleine Abweichungen. Diese Anpassungen waren nötig, da andernfalls die von VISSIM berechneten Positionen der Fahrzeuge teilweise in der grafischen Umgebung über die Randlinie des Fahrflächenrandes in den Pannestreifen gefahren wären.

3.1.3 Verkehrszuflüsse und Verkehrszusammensetzung

Ein jedes Verkehrsmodell bedarf einer Anpassung an die jeweiligen lokalen Situationen, um korrekte Aussagen und Vorhersagen treffen zu können. Allerdings finden sich auf den österreichischen Autobahnen zum Teil sehr unterschiedliche Verkehrszusammensetzungen wieder. Dabei ergeben sich sowohl zeitabhängige Schwankungen (Tagesganglinie, Jahresganglinie) als auch örtliche Schwankungen (abhängig von der Nähe zu Städten und dem Vorhandensein von Industrie und Gewerbe). Aus den Verkehrszählungen der ASFINAG im gesamten Jahr 2016 ergab sich an den rund 270 Dauerzählstellen ein Schwerverkehrsanteil von mindestens 2% und maximal etwas mehr als 40%

im durchschnittlichen täglichen Verkehr (welcher an den Wochentagen von Montag bis Sonntag erhoben wurde). Als generelle Annahme wurde somit in den mikroskopischen Verkehrsflussmodellen ein Schwerverkehrsanteil von 10% angesetzt. Zur Abschätzung der benötigten Fahrzeugzuflüsse wurde die RVS 03.01.11 herangezogen. Danach ist die Kapazität nicht streng linear von der Fahrstreifenanzahl abhängig. Weiters ergibt sich mit zunehmendem Schwerverkehrsanteil eine Reduktion der Kapazität einer Fahrbahn.

Tabelle 2 Richtwerte für Leistungsfähigkeiten bei Richtungsfahrbahnen mit Steigungen bis 2% laut RVS 03.01.11

Schwerverkehrs- anteil SV [%]	Anzahl der Fahrstreifen FStr [-]		
	2	3	4
0	3900	5900	7850
10	3600	5550	7500
20	3250	5200	7200

Aus Tabelle 2 geht hervor, dass der Richtwert der Kapazität für das Modell bei 5550 Fahrzeugen auf der Hauptfahrbahn (HFB) liegt. Die Ermittlung der Anzahl an aus- und einfädelnden Fahrzeugen je Knoten erfolgte über die bei Geistefeldt [2015] beschriebene Formel:

$$p_{q,i} = n_{E/A} \cdot \frac{n_{HFB}}{(n_{HFB} - 0,5)} \cdot p_i \quad (3-1)$$

- p_q Belastungsverhältnis $q_{PE,E}/q_{PE,O}$ bzw. $q_{PE,A}/q_{PE,U}$ in Abhängigkeit vom betrachteten Teilknoten
- $q_{PE,E}$ Verkehrsstärke des einfahrenden Fahrzeugstroms (bei einer Einfahrt)
- $q_{PE,O}$ Verkehrsstärke oberhalb (stromaufwärts) einer Einfahrt
- $q_{PE,A}$ Verkehrsstärke des ausfahrenden Fahrzeugstroms (bei einer Ausfahrt)
- $q_{PE,U}$ Verkehrsstärke unterhalb (stromabwärts) eines Teilknotenpunkts (einer Ausfahrt)
- i Index für die Belastungsverhältnisse 1 bis 6 (Geraden in Abbildung 16)
- $n_{E/A}$ Anzahl der Fahrstreifen in der Einfahrt bzw. Ausfahrt
- n_{HFB} Anzahl der Fahrstreifen der Hauptfahrbahn stromaufwärts von Einfahrten bzw. stromabwärts von Ausfahrten oder Verflechtungsstrecken
- p_i Hilfsgröße für die Auslastung der Knotenpunkte: G1: 100%, G2: 70%, G3: 45%, G4: 30%, G5: 20%, G6: 10%

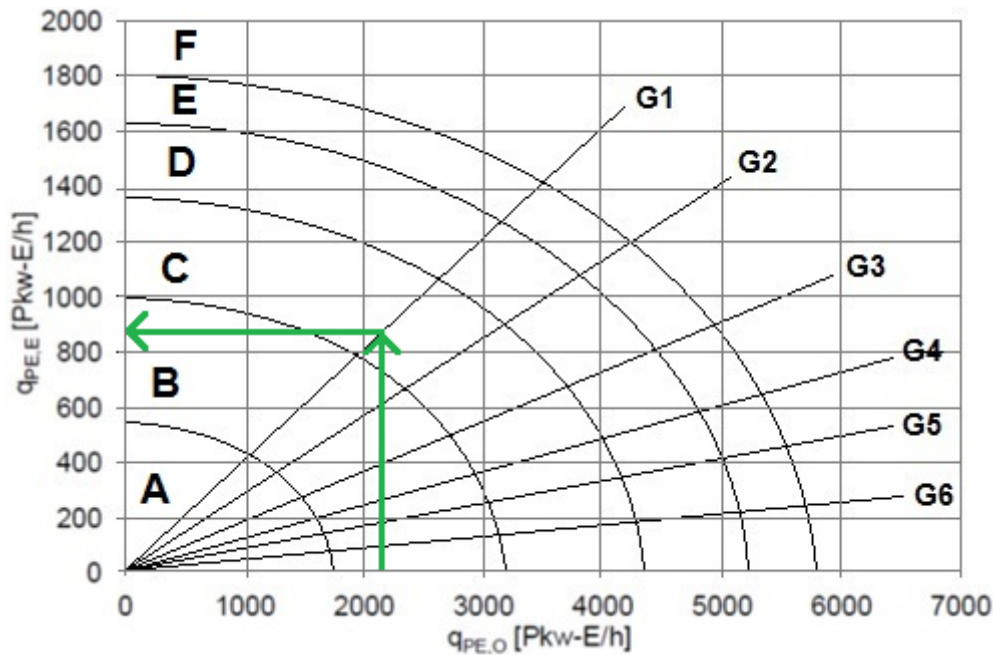


Abbildung 16 Beispielhafte Belastungsverhältnisse einer Einfahrt auf dreistreifiger Hauptfahrbahn [Geistefeldt, 2015]

Abbildung 16 zeigt beispielhaft die Verteilung der für Formel (3-1) nötigen Hilfsgrößen G1 bis G6 für eine Einfädungsstrecke (wie in Abbildung 13 dargestellt) bei einer dreistreifigen Richtungsfahrbahn. Auf der Ordinate findet man die Verkehrsstärke der Einfahrt ($q_{PE,E}$) und auf der Abszisse ist die Verkehrsstärke der Hauptfahrbahn ($q_{PE,O}$) aufgetragen. Zusätzlich sind die aus dem „Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen“ (kurz: HBS) stammenden Übergangslinien der Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs (Ellipsensegment) eingetragen (siehe FGSV [2015]).

Im Verkehrsflussmodell wird auf eine häufige Interaktion der Fahrzeuge abgezielt, weshalb sich die Bemessung der Zuflüsse bei den Einfahrten an der Geraden G1 orientiert hat. Abbildung 16 zeigt, dass rund 30%⁴ der vom Knoten stromabwärts fahrenden Fahrzeuge somit bei den Einfahrten auf die Hauptfahrbahn auffahren (siehe Abbildung 17). Äquivalent zu diesem Bemessungsverfahren wurde die Anzahl der sich ausfädelnden Fahrzeuge bei den Abfahrten bestimmt. Diese wiesen in etwa dieselben Werte auf wie jene bei der Bemessung der einfädelnden Fahrzeuge. Um einen konstanten Verkehrsstrom vor und nach einem Knoten zu erhalten, wurden gleich viele abfahrende wie auffahrende Fahrzeuge modelliert.



Abbildung 17 Aufteilung der Verkehrszuflüsse bei einer Einfahrt [eigene Darstellung]

Ausgehend von dem in Tabelle 2 angegebenen Richtwert der Kapazität wurden Modelle mit unterschiedlichen Verkehrsstärken (zwischen 50% und 80% der Kapazität) im Fahrsimulator getestet.

⁴ Angenommen das rund 1000 Pkw-E/h vor der Einfahrt auf der HFB fahren, ergibt sich ein Schnittpunkt mit der Gerade G1 wenn weitere 400 Pkw-E/h über die Einfahrt auffahren. Somit stellt der zuströmende Verkehrsfluss rund 30% $\left(= \frac{400 \text{ [Pkw-E/h]}}{1400 \text{ [Pkw-E/h]}} * 100 \right)$ der gesamten stromabwärts fließenden Verkehrsstärke da.

Dabei hat sich gezeigt, dass sich bei hohen Verkehrsstärken und der hohen Anzahl an zu- und abfahrenden Fahrzeugen an den Knotenpunkten eine Rückstauung auf die Hauptfahrbahn (primär auf den rechten Fahrstreifen) ergab, welche zu einer Abminderung der Reisegeschwindigkeit führte. Dabei wurde das Ego-Fahrzeug vermehrt auf den mittleren oder linken Fahrstreifen gesteuert, wodurch sich die Anzahl an Interaktionen mit den aus- und einfädelnden Fahrzeugen reduzierte. Aus diesem Grund wurde für die Durchführung der Probandenstudie in den Simulationsszenarien eine Verkehrsstärke von rund 50% der Kapazität angesetzt.

Da VISSIM in den *.fzp Dateien alle (zuvor definierten) Daten sämtlicher sich im Modell befindender Fahrzeuge in jedem Zeitschritt mitprotokolliert, ergeben sich bei großen Zuflüssen und langer Laufzeit große Datenmengen. Da der Hauptfokus dieser Arbeit auf dem Auswerten der Fahrverhalten der Probanden liegt, wurde eine zeitliche Abstufung der Zuflüsse bei den Einfahrten vorgenommen, um die Datenmenge einzuschränken. So wurden Fahrzeuge nur in einem definierten Zeitfenster in die entsprechenden Einfahrten eingeleitet. Die Zeitfenster der einzelnen Zuflüsse wurden mit einem einfachen Weg-Zeit-Diagramm ermittelt (siehe Abbildung 18). Dabei wurde beim Zufluss auf der HFB ein Zeitfenster von rund 4 Minuten (≈ 240 Sekunden) gewählt, innerhalb dessen der Proband losfahren musste. Für die Ermittlung der restlichen Start- und Endzeitpunkte der Zuflüsse wurde angenommen, dass sich das Ego-Fahrzeug mit mindestens 80 km/h, jedoch nicht permanent schneller als 150 km/h bewegt (es gilt die in Österreich übliche höchstzulässige Geschwindigkeit von 130 km/h auf Autobahnen für Pkws). Da die Distanzen zu den einzelnen Knotenpunkten bekannt waren, konnten die frühesten ($t_{k(i),s}$) und spätesten ($t_{k(i),e}$) Zeitpunkte der Zuflüsse über Umformung der Formel $v = s/t$ mit ausreichender Genauigkeit berechnet werden.

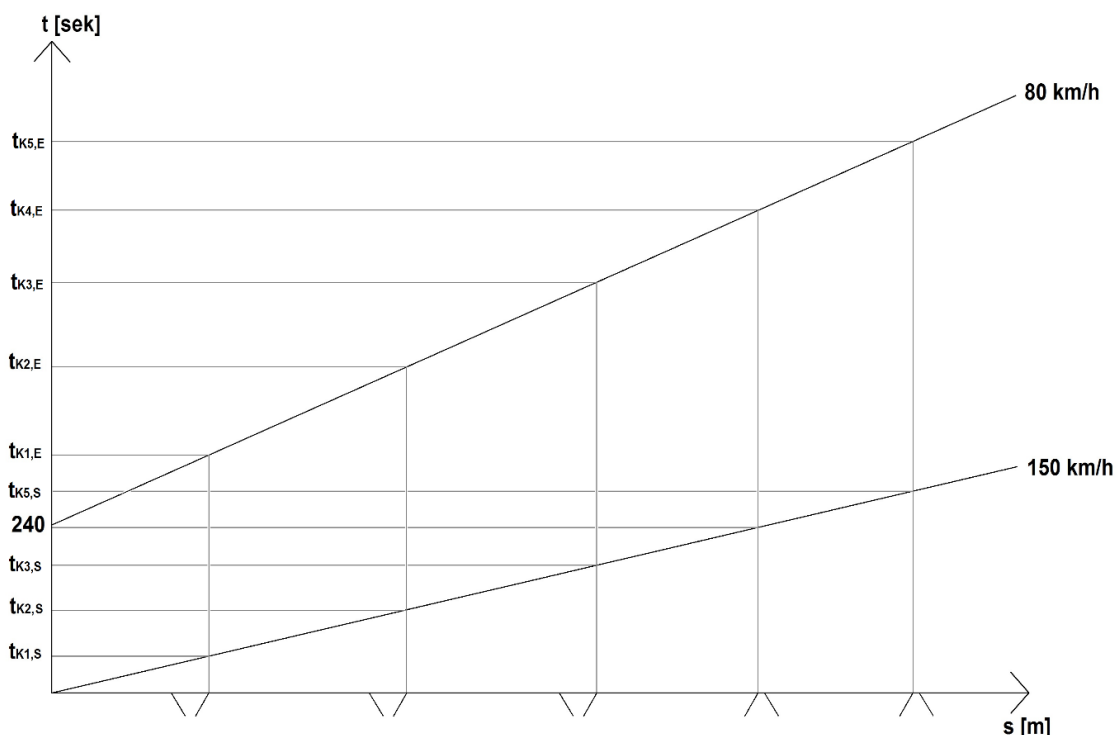


Abbildung 18 Schema des Weg-Zeit-Diagramms zur Zeitpunktbestimmung des Zuflusses [eigene Darstellung]

3.1.4 Fahrverhalten der VISSIM-Fahrzeuge

Da sich das Fahrverhalten einer FFE während einer Fahrt durchaus ändern kann, bietet VISSIM die Möglichkeit, das Fahrverhalten streckenabhängig einzelnen Fahrzeugklassen (diese können aus

mehreren Fahrzeugtypen bestehen) zuzuweisen. In diesem Verkehrsflussmodell wurde daher das Fahrverhalten abhängig von den vier vorhandenen Streckentypen (Einfahrt, Ausfahrt, Verflechtung und Hauptfahrbahn) unterschieden. Zusätzlich zu den vier Streckenverhaltenstypen wurde eine Unterscheidung in das Fahrverhalten von Pkws und Lkws vorgenommen, wodurch sich die Anzahl auf 8 Streckenverhaltenstypen verdoppelte. Diese Streckenverhaltenstypen bildeten in weiterer Folge einen wesentlichen Bestandteil der verschiedenen Simulationsszenarien, wobei diese Typen noch nach dem betreffenden Szenario zu unterscheiden sind. Genaue Definitionen der Fahrverhalten finden sich in den Unterabschnitten 3.1.5 und 3.1.6 sowie Fellendorf et al. [2017].

In VISSIM wird einem jeden Fahrzeug ein Fahrverhalten (zum Teil streckenabhängig) zugewiesen. Dabei unterscheiden sich die Parameter für Folgeverhalten und Fahrstreifenwechselverhalten bei unterschiedlichen Fahrzeugtypen zum Teil deutlich. Über eine Setzung von „Wunschgeschwindigkeitsentscheidungen“ oder „Langsamfahrbereichen“ können zudem die Geschwindigkeiten für den weiteren Streckenverlauf oder einen abgegrenzten Teil beeinflusst werden. Über Geschwindigkeitsverteilungen kann eine Bandbreite an unterschiedlichen Geschwindigkeiten für eine solche Entscheidung gesetzt werden. Über die Wunschbeschleunigungs- oder Wunschverzögerungskurven können die Geschwindigkeitsänderungen beeinflusst werden. Mit Hilfe dieser und ähnlicher Verteilungen können die unterschiedlichen menschlichen Fahrverhalten für definierte Strecken nachgebildet werden. Geistefeldt et al. [2015] liefert diesbezüglich bereits gut abgestimmte VISSIM-Parameter für die (in dieser Arbeit untersuchten) Fahrverhalten von Fahrzeugen mit unterschiedlichen Automatisierungsstufen im hochrangigen Netz. Allerdings ist dabei zu beachten, dass diese Werte das Fahrverhalten auf deutschen Autobahnen widerspiegeln. Aufgrund von Ähnlichkeiten im Fahrverhalten deutscher Autofahrer zu jenem der österreichischen Autofahrer wurden die Einstellungen bezüglich Folgeverhalten und Fahrstreifenwechselverhalten von Geistefeldt et al. [2015] übernommen. Für die Verteilungskurven der Wunschgeschwindigkeiten, Wunschbeschleunigungen und -verzögerungen wurden jedoch abweichende Werte angenommen, welche der Situation auf österreichischen Autobahnen näher kommen. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Fahrverhalten werden in den nachfolgenden Unterabschnitten näher beschrieben.

Um zusätzlich zu dem Fahrbereich mit der laut österreichischer Straßenverkehrsordnung 1960 höchstzulässigen Geschwindigkeit von 130 km/h Daten bei niedrigeren Geschwindigkeiten zu sammeln, wurde nach dem letzten Knoten eine Reduktion der Wunschgeschwindigkeit aller VISSIM-Fahrzeuge auf 60 km/h vorgenommen (siehe Abbildung 9). Dadurch sollte ein künstlicher Stau mit zähfließendem Verkehr simuliert werden.

3.1.5 Fahrverhalten SAE level 0

Ein Fahrverhalten entsprechend SAE level 0 beschreibt das menschliche Fahrverhalten ohne den Einsatz von Fahrassistenzsystemen (Spurhalteassistent, adaptive Geschwindigkeitsregelung o.Ä.). Dadurch spielen Verteilungsfunktionen eine wesentliche Rolle bei der Simulation der Fahrverhalten in diesem Szenario. Beispielsweise wurde für die Geschwindigkeitsverteilung aller auf der Hauptfahrbahn befindlichen VISSIM-Fahrzeuge, welche der Fahrzeugklasse „PKW“ entsprachen, die unter Abbildung 19 gezeigte Geschwindigkeitsverteilung festgelegt. Für Lkws gilt eine höchstzulässige Geschwindigkeit von 80 km/h auf Autobahnen. Tagsüber werden in dieser Fahrzeugklasse allerdings durchschnittliche Geschwindigkeiten zwischen 84 und 88 km/h gemessen (Vgl. Pumberger et al. [2011]). Aus diesem Grund wurde für Lkws in diesem Fahrverhalten die unter Abbildung 20 gezeigte Verteilung angesetzt. Sowohl Abbildung 19 als auch Abbildung 20 zeigen auf der Abszisse die Wunschgeschwindigkeiten und auf der Ordinate deren Auftrittswahrscheinlichkeit.

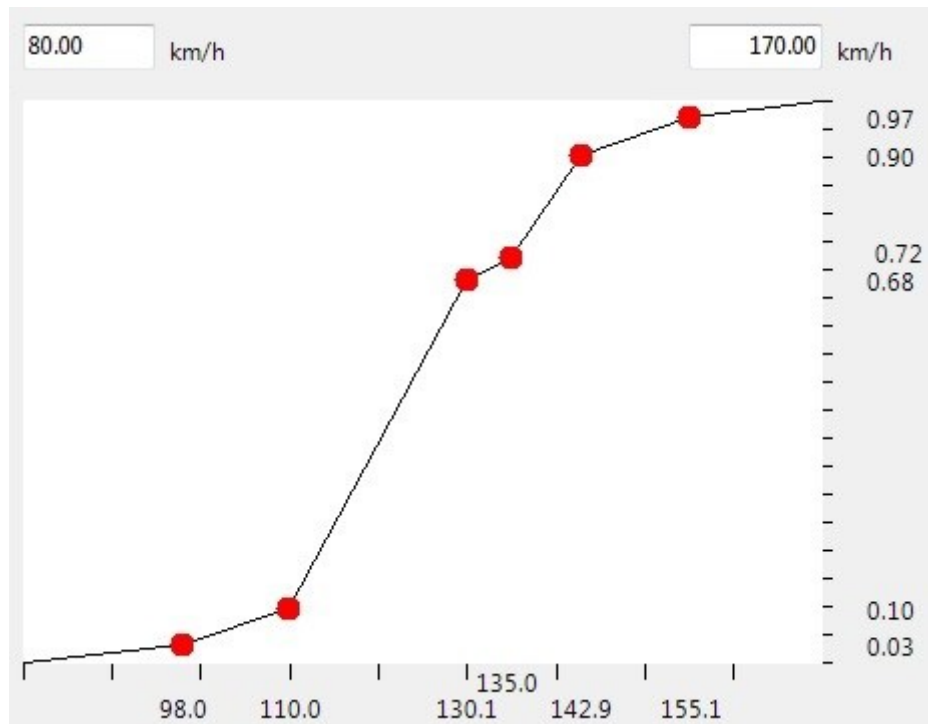


Abbildung 19 Wunschgeschwindigkeitsverteilung für Pkws mit einem Fahrverhalten entsprechend SAE level 0

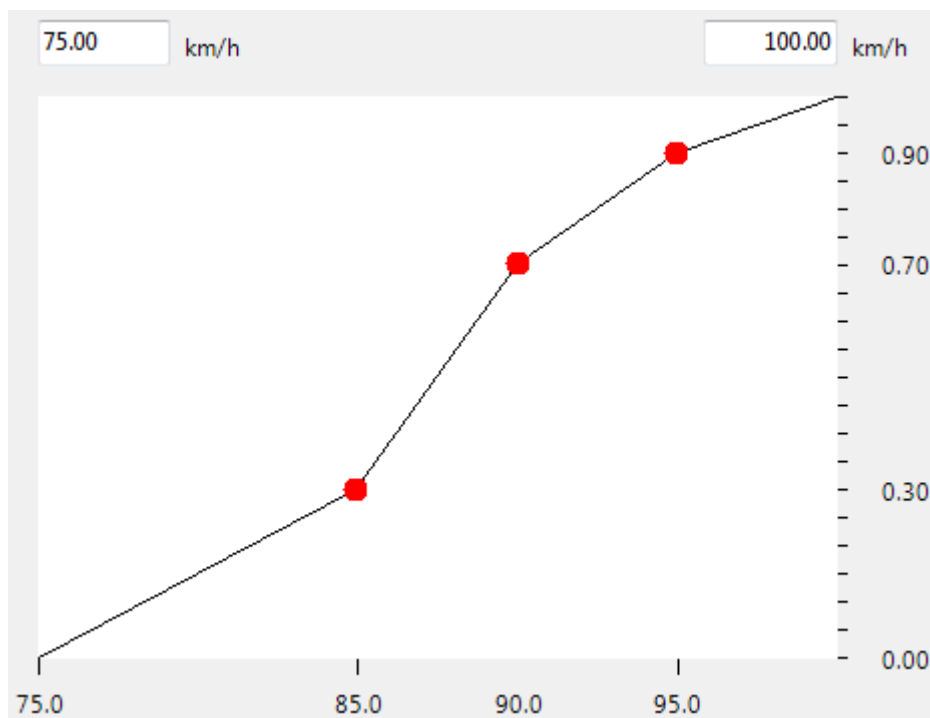


Abbildung 20 Wunschgeschwindigkeitsverteilung für Lkws mit einem Fahrverhalten entsprechend SAE level 0

Wie zuvor beschrieben wurden die Wunschbeschleunigungen und Wunschverzögerungen bei diesen Fahrverhalten ebenfalls adaptiert. Als Grundlage für die Anpassung wurden die im Projekt „Impakt“ (siehe Kölbl et al. [2015]) angesetzten Wunschbeschleunigungs- und Wunschverzögerungswerte

herangezogen⁵. Dabei weichen die Wunschbeschleunigungen und –verzögerungen der Pkws zum Teil deutlich von jenen der VISSIM-Standardwerte ab. Abbildung 21 zeigt eine Übersicht der Pkw-Beschleunigungen ausgehend von den im Projekt „Impakt“ angesetzten Werten. Abbildung 22 zeigt eine Übersicht der Wunsch- bzw Maximalverzögerungen der Pkws.

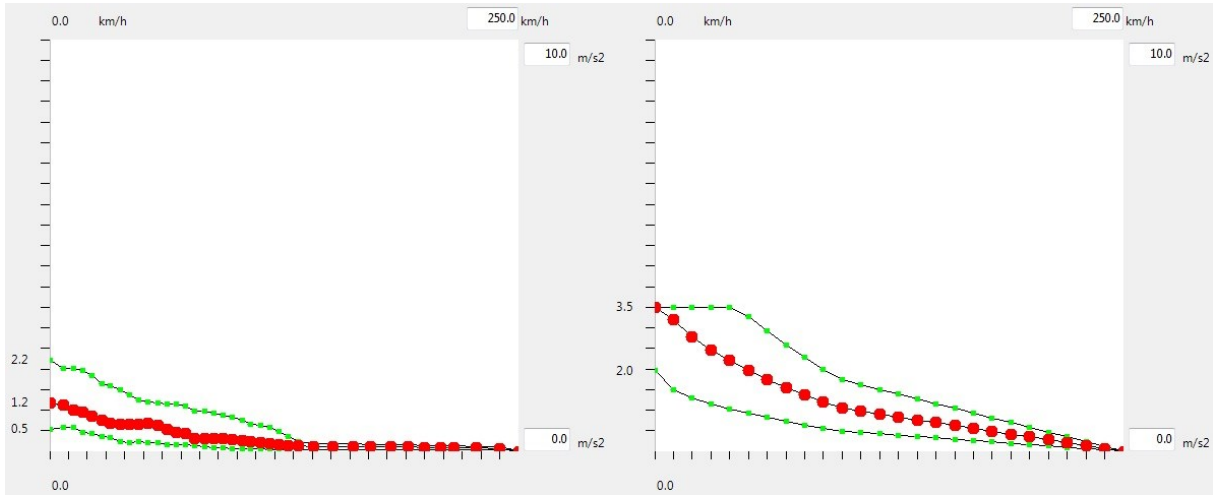


Abbildung 21 Übersicht über die Pkw-Beschleunigungen (Wunschbeschleunigung links, Maximalbeschleunigung rechts)

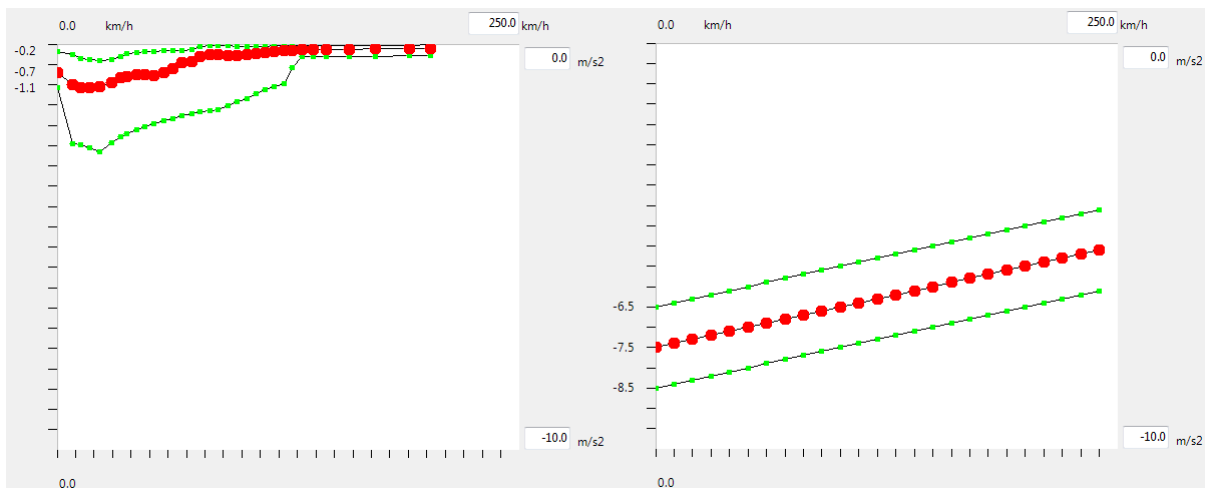


Abbildung 22 Übersicht über die Pkw-Verzögerungen (Wunschverzögerung links, Maximalverzögerung rechts)

Sowohl die Wunschbeschleunigungen und –verzögerungen als auch die Maximalbeschleunigungen und –verzögerungen der Lkws wurden im Projekt Impakt und in dieser Arbeit bei den VISSIM-Standardwerten belassen (siehe Abbildung 23 und Abbildung 24).

⁵ Impakt war ein Forschungsprojekt, an dem das Institut für Straßen- und Verkehrswesen der Technischen Universität Graz beteiligt war. Darin wurden die Auswirkungen kooperativer Dienste in Kraftfahrzeugen auf das Fahrverhalten und in weiterer Folge die Änderungen der Kapazität, der Verkehrssicherheit, des Treibstoffverbrauches und der Schadstoffemission untersucht.

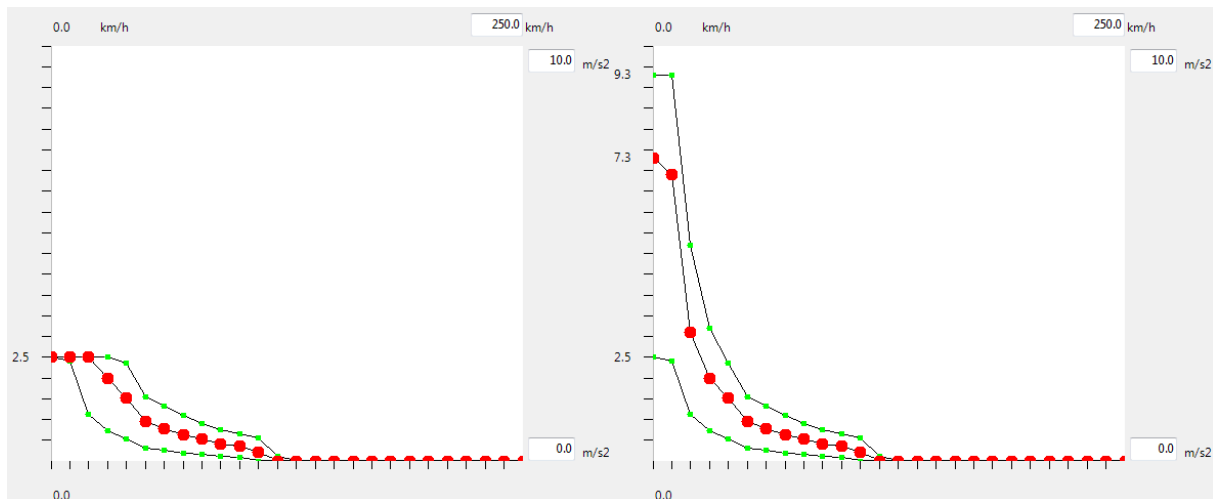


Abbildung 23 Übersicht über die Lkw-Beschleunigungen (Wunschbeschleunigung links, Maximalbeschleunigung rechts)

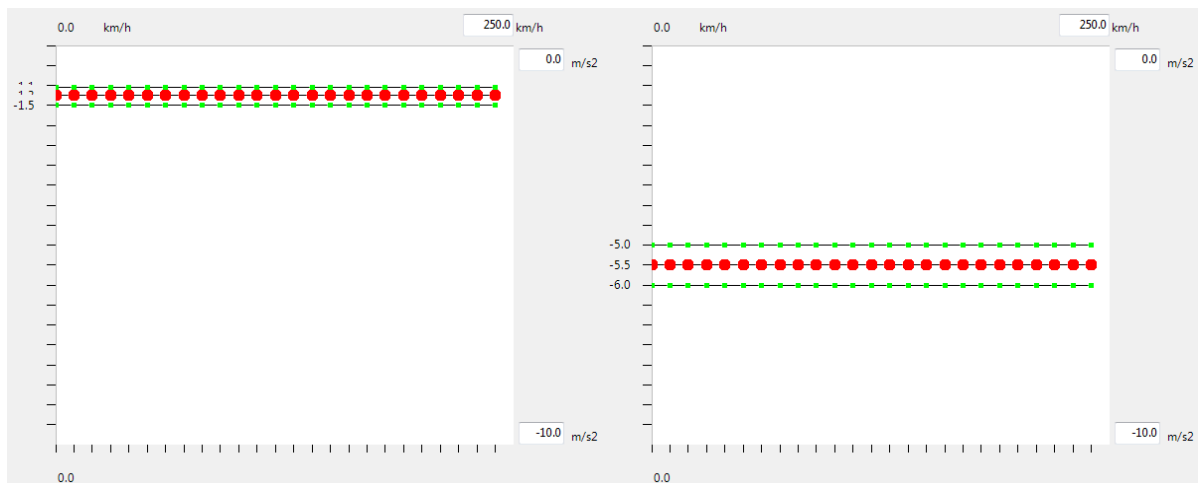


Abbildung 24 Übersicht über die Lkw-Verzögerungen (Wunschverzögerung links, Maximalverzögerung rechts)

Entsprechend Geistefeldt [2015] wurde für Folgefahrten auf der Hauptfahrbahn ein Folgeabstand von 1,05 Sekunden mit einer Vorausschauweite von 250 m für dieses Szenario festgelegt. Zusätzlich wurde eine Berücksichtigung von zwei vorausfahrenden Fahrzeugen im Folgeverhalten definiert. Somit wurde nicht nur das Fahrverhalten des nächsten (vorderen) Fahrzeugs, sondern auch des Fahrzeugs vor dem Vorderfahrzeug mit berücksichtigt, sofern sich diese beiden Fahrzeuge innerhalb der 250 m Vorausschauweite befanden. Die Längsoszillation wurde auf dem VISSIM-Standardwert von 4 m belassen. Laut dem VISSIM 8 – Benutzerhandbuch führt dieser Wert bei der Modellierung des (menschlichen) Fahrverhaltens „zu einem stabilen Folgeverhalten“. Ebenfalls wurde der Wert der Wahrnehmungsschwelle für Folgen auf -8,00 Sekunden belassen. Somit begannen die VISSIM-Fahrzeuge bei einer Annäherung an ein vorausfahrendes langsames Fahrzeug 8 Sekunden vor dem Erreichen des Sicherheitsabstandes mit der Geschwindigkeitsreduktion.

Eine Auflistung aller eingestellten Folge- und Fahrstreifenwechsel-Parameter entsprechend dem SAE level 0 findet sich im Anhang in den Unterabschnitten 10.1.1 und 10.1.2. Die genauen Werte der Wunschbeschleunigungen und Wunschverzögerungen sind dem digitalen Anhang zu entnehmen.

3.1.6 Fahrverhalten SAE level 4

Das Fahrverhalten entsprechend SAE level 4 wurde primär über *.dll-Dateien gesteuert. Dabei wurden getrennte DLLs für das Fahrverhalten von Lkws und von Pkws entwickelt. Diese DLL-Dateien steuern ab dem Zeitpunkt der Übernahme die Beschleunigungen und das Querverhalten der jeweiligen Fahrzeuge. Fahrzeuge, welche über eine Einfahrt an einem Knoten in das Modell einfließen, bezogen somit erst ab dem Verlassen der Einfädungsstrecke ihr Fahrverhalten aus den DLL-Dateien. Zuvor wurden die Fahrzeuge über die im Anhang unter 10.1.3 bis 10.1.6 definierten Fahrverhaltensparameter gesteuert. Um eine reibungslose Übergabe zu ermöglichen, wurde für die Einfädungsstrecken in VISSIM eine Annäherung an die automatisierten Fahrfunktionen im Fahrverhalten umgesetzt. Die Parameter für das Folge- und Fahrstreifenwechselverhalten der VISSIM-Fahrzeuge können dem Anhang in Unterabschnitt 10.1.3 und 10.1.4 entnommen werden.

Für das durch VISSIM gesteuerte Fahrverhalten in den Bereichen der Einfädungsstrecken ergaben sich folgende Annahmen:

Im Gegensatz zu dem menschlichen Verhalten wird angenommen, dass bei automatisierten Fahrzeugen keine Streuungen im Fahrverhalten auftreten (vgl. Krause et al. [2017]). Dementsprechend wurde allen Pkws, welche anschließend durch die DLL-Dateien gesteuert wurden, eine Wunschgeschwindigkeit von exakt 130 km/h zugewiesen (siehe Abbildung 25 links). Die Wunschgeschwindigkeit aller Lkws wurde im Rahmen dieser Probandenstudie bei automatisierten Fahrfunktionen auf exakt 90 km/h angesetzt (siehe Abbildung 25 rechts). Ausschlaggebend war das die derzeitigen Geschwindigkeiten von Lkws auf Autobahnen bei rund 90 km/h liegen und eine Abminderung der Geschwindigkeit bei automatisierten Fahrzeugen (auf 80 km/h) für Unternehmer unattraktiv ist (vgl. Pumberger et al. [2011]). Diese Minderung der Attraktivität wurde über die Zeitverluste bei einer Fahrt mit 80 km/h erklärt.

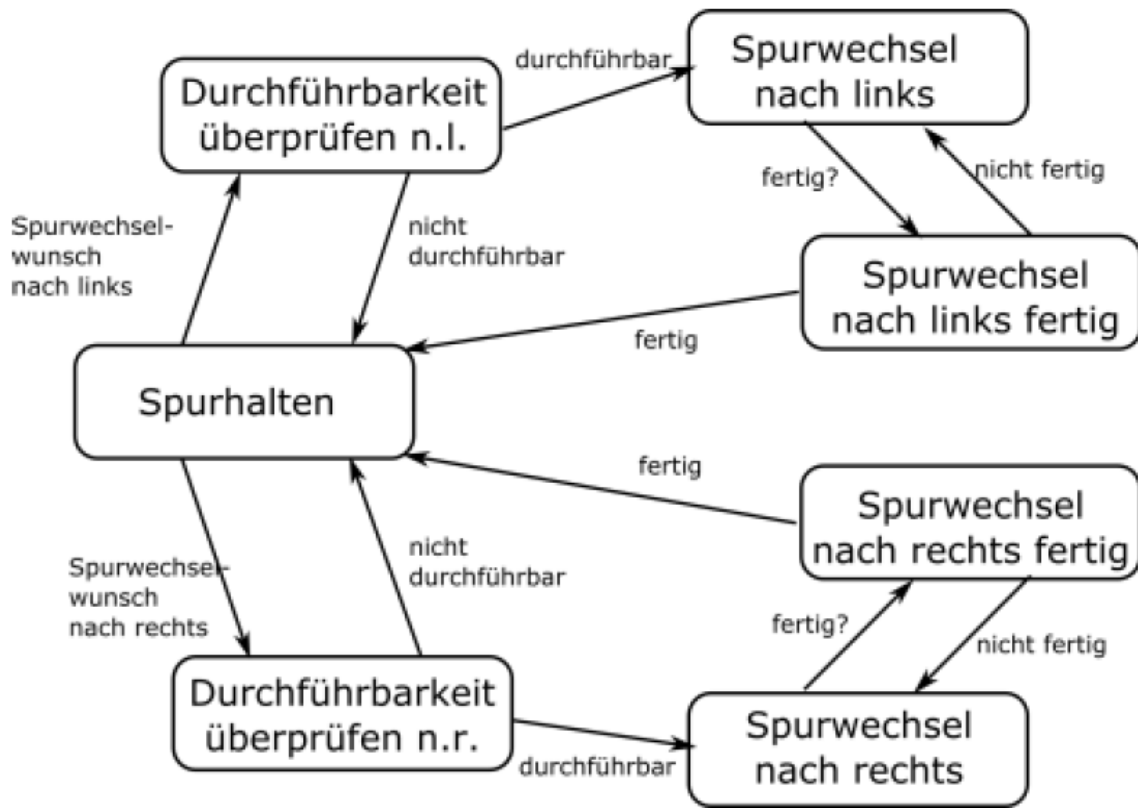
Nachdem die Maximalwerte der Beschleunigung und der Verzögerung fahrzeugspezifische Werte (abhängig von der Motorisierung, dem Fahrzeuggewicht und Ähnlichem) darstellen, wurden diese Werte gegenüber jenen im Fahrverhalten SAE level 0 nicht abgeändert. Ebenfalls wurden die Werte der Wunschbeschleunigung und der Wunschverzögerung aus dem Fahrverhalten SAE level 0 übernommen.



Abbildung 25 Wunschgeschwindigkeitsverteilungen für Pkws (links) und Lkws (rechts) mit einem Fahrverhalten entsprechend SAE level 4

Die Parameter der Fahrverhalten entsprechend SAE level 4 können, wie bei Fellendorf et al. [2017] beschrieben, wie folgend zusammengefasst werden:

Bei der Automatisierungsstufe SAE level 4 wird angenommen, dass die Fahrzeuge hoch automatisierte Fahrfunktionen inklusive V2V-Technologien (Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation) besitzen. Dadurch soll eine Bildung von Fahrzeugkonvois mit kurzen Sicherheitsabständen zwischen den Fahrzeugen (Platooning) ermöglicht werden, ohne dass Einbußen zu Lasten der Sicherheit hingenommen werden müssen. Für den Verkehrsfluss bedeutet die Bildung eines solchen Platoons, dass sich eine höhere Verkehrsdichte auf freier Strecke ergibt. In der Nähe von Auf- und Abfahrten wird angenommen, dass große Platoons negative Auswirkungen auf den Verkehrsfluss haben. Aus diesem Grunde wurde die Anzahl an Fahrzeugen innerhalb eines Platoons auf 2 bis 5 Fahrzeuge beschränkt. Zusätzlich konnten aus technischen Gründen nur Fahrzeuge der selben Fahrzeugklasse (hier: Lkw oder Pkw) in ein Platoon eingebunden werden. Befand sich ein Fahrzeug nicht innerhalb eines Platoons, so wurde ein Sicherheitsabstand von 0,9 Sekunden bzw. von 1,8 Sekunden eingehalten. Der Folgeabstand von 0,9 Sekunden wurde gewählt, da im realen Verkehr häufig Sicherheitsabstände von 0,8 bis 0,9 Sekunden auf Autobahnen zu beobachten sind (vgl. Wagner [2016]).



**Abbildung 26 Fahrstreifenwechselmodell der Fahrzeuge, welche über die DLL gesteuert werden
Fellendorf et al. [2010]**

Zusätzlich zu dem Längsverhalten wurde in der DLL auch das Fahrstreifenwechselverhalten der VISSIM-Fahrzeuge gesteuert. Dabei wurden den VISSIM-Fahrzeugen in der DLL (ähnlich dem Fahrstreifenwechselmodell nach Sparmann – Unterabschnitt 2.3.2) ein Fahrstreifenwechselstatus zugewiesen. Abhängig von diesem Status wurde überprüft ob ein Fahrstreifenwechselwunsch in eine Richtung (Links oder Rechts) besteht und ob dieser Fahrstreifenwechsel möglich ist oder ob ein „Unfall“ riskiert wird. Sofern der entsprechende Fahrstreifenwechsel möglich ist, wurde dieser eingeleitet und der Status entsprechend geändert. Nach dem Abschluss des FS-Wechsels wurde in

der DLL dem jeweiligen Fahrzeug ein Status zugewiesen, welcher den Abschluss des FS-Wechsels mit der realtiven Wechselrichtung beschreibt. Somit konnte verhindert werden, dass ein Fahrzeug unmittelbar nach dem Abschluss auf den ursprünglichen Fahrstreifen zurückwechselt. Dieser Ablauf wurde in Abbildung 26 schematisch dargestellt.

3.2 Fahrsimulator

Anschließend an die Erläuterungen zum Verkehrsflussmodell soll nun auf die Miteinbeziehung des Fahrsimulators in die Studie eingegangen werden. Im Unterschied zu einer Studie im realen Verkehr können bei einer Studie im Fahrsimulator nicht nur Daten einzelner Fahrzeuge (meist nur jene der Studienfahrzeuge, welche mit verschiedensten Sensoren und Instrumenten zur Protokollierung ausgestattet worden sind), sondern vielmehr die Daten aller Fahrzeuge in der Simulation aufgezeichnet werden. Dies stellt eine optimale Gegebenheit dar, um einerseits das Fahrverhalten der Probanden bezüglich ihres Folge- und Fahrstreifenwechselverhaltens (akzeptierte Wegelücken) zu untersuchen, und um andererseits die Reaktionen der Probanden bei unterschiedlichem Fahrverhalten der umliegenden Verkehrsteilnehmer (z.B. über Nachbildung unterschiedlicher SAE-Stufen) zu testen. Mit abschließenden Fragen zur Fahrverhaltensbewertung am Ende eines jeden Szenarios kann zusätzlich noch das Empfinden und die Akzeptanz der Probanden bei verschiedenen Automatisierungsstufen der umliegenden Verkehrsteilnehmer erhoben werden. So können neben den messbaren Auswirkungen durch technische Errungenschaften auch die Änderungen des subjektiven menschlichen Empfindens und Verhaltens mit in die Auswertungen einfließen. Dies wird dadurch ermöglicht, dass Fahrsimulatoren dafür konzipiert wurden, den Benutzer in eine simulierte Umgebung zu versetzen, in welcher seine Handlungen möglichst realitätsnahe Reaktionen verursachen. Die simulierte Umgebung lässt sich dabei frei an die Anforderungen der jeweiligen Studie anpassen.

Aufbau und Qualität der Peripheriegeräte von Fahrsimulatoren weisen heutzutage eine große Schwankungsbreite auf. Eine einfache Form eines Fahrsimulators kann mit einem PC, Monitor und Joystick (Lenkrad) umgesetzt werden. Da sich die Probanden möglichst natürlich in der Simulation verhalten sollten, fiel die Entscheidung allerdings auf den Fahrsimulator des Instituts für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Graz. Dieser nutzt als Peripheriegerät zwischen Benutzer und Simulation ein Vollfahrzeug (Mini Countryman) mit intaktem Innenraum auf Basis eines Fahrzeugs mit Automatikgetriebe. Der Motor und die Antriebskomponenten wurden jedoch ausgebaut, wodurch zusätzlicher Platz für Mess-, Steuerungs- und sonstige Komponenten generiert werden konnte. Für die Steuerung des virtuellen Ego-Fahrzeugs ergibt sich für den Benutzer somit keine Abweichung zu jener eines realen Fahrzeugs. Lenkeinschläge, Betätigungswinkel an den Pedalen und sonstige Aktionen durch den Benutzer werden in Echtzeit für die Simulation verarbeitet. Eine Visualisierung der Fahrumgebung wird - wie in Abbildung 27 ersichtlich - über insgesamt neun Monitore umgesetzt (vier Monitore im Bereich der Frontscheibe, jeweils zwei im Bereich der Seitenfenster, sowie ein weiterer, der den Rückspiegel bedient) Lange et al. [2017]. Die Frontbildschirme sind mit Parallaxbarrieren versehen, wodurch sie im Bedarfsfall als autostereoskopische Displays verwendet werden können. Für die Berechnung der Visualisierungen sorgen vier Rechner mit leistungsstarken Grafikkarten (vgl. Schinko et al. [2016]). Um eine passende akustische Kulisse zu generieren, wird über das HiFi-System und zusätzliche Bass-Shaker ein errechnetes Motor-, Abroll- und Windgeräusch in den Innenraum eingespielt. Zur Abschottung von äußeren Eindrücken wurde eine Massivholz-Box mit schallabsorbierenden Elementen um den Fahrsimulator errichtet. Neben dem passiven Feedback (mittels Federmechanismus) am Gaspedal

wird auch ein aktives haptisches Feedback mittels Aktuatoren bei der Lenkung und bei Bremsvorgängen erzeugt (vgl. Lange et al. [2017]). Aus einem vorangegangenen Projekt namens „RENNT“ bestand im Rechnernetz des FASIs bereits eine Schnittstelle, welche eine Einspielung extern berechneter Mikrosimulationen (unter VISSIM) erlaubt.

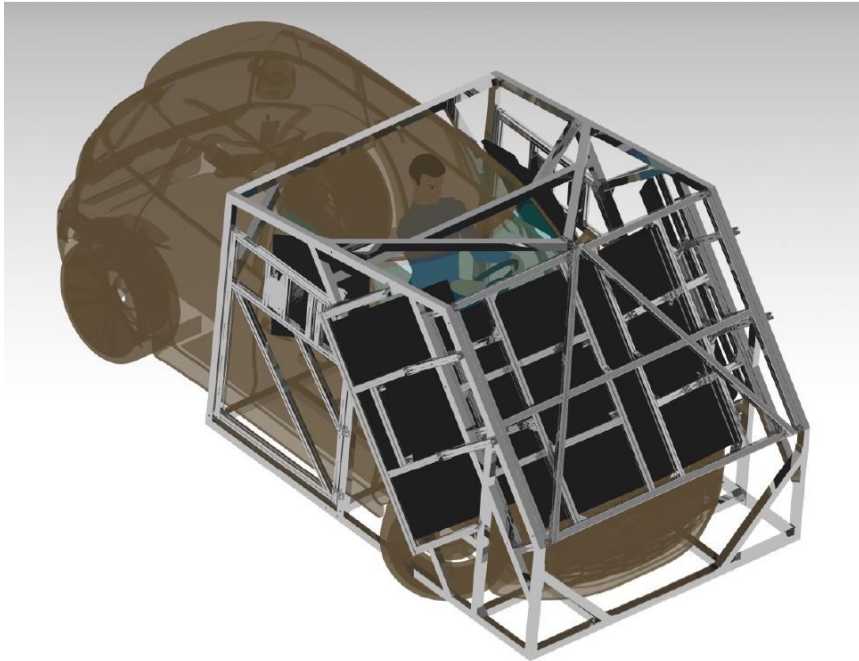


Abbildung 27 Aufbau des Fahrersimulators im FTG [Hammer, 2015]

Der Laborcharakter eines Fahrersimulators ermöglicht es, nahezu alle gewünschten Daten aufzuzeichnen. Neben den exakten Fahrzuständen (Geschwindigkeiten, Positionen etc.) des Ego-Fahrzeugs als auch aller weiteren Fahrzeuge innerhalb der Simulation können beispielsweise auch Herzraten (Pulsschlag der Probanden), EYE TRACKING und durch Erfragen sogar Wünsche oder Anmerkungen der Probanden erfasst und ausgewertet werden. Auf die Erfassung von Herzraten und den Einsatz von EYE TRACKING wurde im Rahmen dieser Studie jedoch verzichtet.

3.3 Probandenstudie

Da im Rahmen dieser Masterarbeit insbesondere Änderungen im menschlichen Verhalten bei Interaktionen mit automatisierten Fahrzeugen erforscht werden sollten, war zu diesem Zweck die Durchführung einer Probandenstudie naheliegend.

Mittels einer Probandenstudie kann die Wirkung des Fahrverhaltens anderer Verkehrsteilnehmer überprüft werden. So kann das nachgebildete menschliche Fahrverhalten (SAE level 0) überprüft werden, um für nachfolgende Studien wertvolle Verbesserungsvorschläge zu erhalten. Bei Szenarien mit dem automatisierten Fahrverhalten (SAE level 4) stehen vor allem die Akzeptanz und die Reaktionen der Probanden im Fokus. Aus diesem Grunde wurde beschlossen, eine Befragung am Ende eines jeden Szenarios durch einen Interviewer durchzuführen. Zusätzlich wurden Anmerkungen der Probanden während der Fahrt in einem freien Bereich des Fragebogens mit aufgenommen. Um neben den in den *.fzp-Dateien gespeicherten Fahrzeugdaten auch visuelle Aufzeichnungen zur erleichterten Nachvollziehbarkeit der Verkehrssituation zu erhalten, wurde eine Kamera im Inneren des FASIs installiert. Ein Bildausschnitt der Kamera ist in Abbildung 28 ersichtlich. Diese Videos ermöglichen ebenfalls eine Zuordnung der im Fragebogen mitnotierten Anmerkungen der Probanden

zu spezifischen Situationen während des Simulationslaufs, welche über die Aufzeichnungen der *.fzp-Dateien ausgewertet werden konnten.



Abbildung 28 Innenperspektive des Fahrsimulators während der Probandenstudie

In der im Rahmen dieser Masterarbeit durchgeführten Probandenstudie wurden zunächst allgemeine soziodemographische Daten und Angaben zum Mobilitätsverhalten der Probanden aufgenommen (siehe auch Abschnitt 4.1). Im Zuge des nachfolgenden Einführungsgesprächs wurden die wichtigsten Eckpunkte für die Simulatorstudie (höchstzulässige Geschwindigkeit; Ablauf der Simulatorstudie; Hinweise darauf, dass die Probanden auf das Fahrverhalten der „anderen“ Fahrzeuge achten sollen etc.) besprochen. Vor dem Start der Erhebungsszenarien wurde überdies eine Eingewöhnungsfahrt mit den Probanden durchgeführt. Diese diente einerseits dazu, den „Start der einzelnen Szenarien zu probieren“ und andererseits dazu, dass sich die Probanden an die Steuerung und das Fahrverhalten des Fahrsimulators gewöhnen konnten. Ein Probelauf der Startprozedur war besonders bei motivierten Probanden nötig, da diese oftmals sofort nach Laden der Umgebungsgrafik losfahren wollten. Ein verfrühter Start bereitete dem Fahrsimulator jedoch Probleme mit der richtigen Ortung und der Steuerung des Ego-Fahrzeugs innerhalb der Simulation, wodurch diese abgebrochen und neu gestartet werden musste. Zusätzlich benötigte die Befüllung der Teststrecke mit VISSIM-Fahrzeugen eine gewisse Vorlaufzeit und dem Ego-Fahrzeug musste noch manuell der Fahrzeugtyp „1“ (welcher für den FASI freigehalten wurde) zugewiesen werden. Durch das Warten wurde der Verkehrsfluss bei der Befüllung allerdings auch beeinflusst. Die Startposition des Ego-Fahrzeugs befand sich auf dem dritten Fahrstreifen und die Ausrichtung war quer zur Fahrtrichtung. Somit wurden die Probanden angewiesen, nach dem Laden der „Lenkrad-Treiber“ zuerst auf den rechten Fahrstreifen der Autobahn zu fahren, um den angestauten Verkehr abfließen zu lassen. Dabei wurde darauf geachtet, dass das Ego-Fahrzeug nicht den Pannestreifen befährt, da dieser in dem VISSIM-Modell nicht aufgenommen wurde. Eine Befahrung des Pannestreifen hatte in den *.fzp-Dateien die Folge, dass das Ego-Fahrzeug aus den Aufzeichnungen verschwand.

Um den Probanden die Konzentration auf das „eigene Fahrzeug“ (sowohl auf die Handhabung des „Automatikgetriebes“, als auch die Fahrdynamik innerhalb der Simulation) zu erleichtern, wurde das Fahrverhalten SAE 0 für die VISSIM-Fahrzeuge bei der Eingewöhnungsfahrt geladen. Diese

Entscheidung beruhte auf der Annahme, dass sich Probanden leichter auf Sachen abseits des Verkehrsgeschehens konzentrieren können, wenn andere Verkehrsteilnehmer ein gewohntes (menschliches) Fahrverhalten an den Tag legen.

Bei der Durchführung der Probandenstudie wurde allen VISSIM-Fahrzeugen innerhalb eines Szenarios jeweils eines der folgenden Fahrverhalten zugewiesen:

- SAE 0 (menschliches Fahrverhalten)
- SAE 4 mit 0,9 Sekunden Sicherheitsabstand zwischen den Fahrzeugen
- SAE 4 mit 1,8 Sekunden Sicherheitsabstand zwischen den Fahrzeugen

Durch den Aufbau der Simulationsumgebung konnte ein Szenario in weniger als 10 Minuten komplett durchfahren werden. Mit den drei Szenarien ergab sich somit eine Gesamtfahrzeit von weniger als 30 Minuten. Somit war es den Probanden zumutbar, alle drei Szenarien hintereinander (ohne größere Pausen) zu durchfahren. Dadurch wurde die Wahrscheinlichkeit, dass es bei den Probanden zu Reiseübelkeit (Motion Sickness) kommt, klein gehalten und die Teilnahme an der Studie konnte für die einzelnen Probanden mit weniger als einer Stunde Zeitaufwand abgeschlossen werden. Für die Analyse der Fahrverhalten bedeutet dies jedoch, dass sich ein gewisser Gewöhnungseffekt (bezüglich der Fahrdynamik des FASIs) im Laufe des Durchfahrens der drei Szenarien einstellen kann, wodurch sich eine Verzerrung der Ergebnisse ergeben kann. Bei einer konstanten Szenarienanordnung würde dies zur Folge haben, dass das erste Szenario stets von Probanden befahren wird, welche sich noch nicht an die fahrdynamischen Eigenschaften des FASIs gewöhnt haben und dass die Probanden im dritten Szenario stets ein gewisses Maß an „besserer“ Abschätzung der fahrdynamischen Eigenschaften besitzen. Diesem Effekt kann, wie bei Boll [2011] beschrieben, durch Alternieren der Szenarienreihenfolge entgegengewirkt werden. Die Permutation der Szenarien hilft ebenfalls dabei, den Reihenfolgeeffekt (auch Primacy-Effekt genannt) abzuschwächen. Dieser besagt, dass den Probanden die ersten Eindrücke besonders im Gedächtnis bleiben, wodurch eine unbewusste Beeinflussung der nachfolgenden Szenarien eintreten könnte (vgl. Asch [1946] & Greitemeyer [2012]). Beispielsweise kann es vorkommen, dass die Probanden ein vorsichtigeres Fahrverhalten in den nachfolgenden Szenarien an den Tag legen, wenn sie im ersten Szenario viele kurze Sicherheitsabstände zwischen den VISSIM-Fahrzeugen feststellen. Dies würde bedeuten, dass die Fahrverhalten der Probanden in den nachfolgenden Szenarien erhöhte Sicherheitsabstände aufweisen, welche bei einer anderen Anordnung der Szenarien nicht vorzufinden wären. Aus diesem Grund wurde eine Permutation entsprechend Tabelle 6 (siehe Anhang Abschnitt 10.2) vorgenommen.

Zu erwähnen bleibt, dass durch Proband 11 die Simulatorstudie kurz vor dem Ende der dritten Simulation (Szenario: SAE0) infolge aufkommender Übelkeit abgebrochen wurde. Schmidt [2016] schreibt, dass bei Fahrsimulatoren ohne Bewegungssystem „die optischen und kinästhetisch wahrgenommenen Sinneseindrücke nicht miteinander überein[stimmen], was bei vielen Probanden zur Simulatorkrankheit führt.“ Die Simulatorkrankheit ist eine Form der Reisekrankheit, bei der häufig Desorientiertheit und Übelkeit auftreten, wobei die Symptome bei den meisten Personen innerhalb einer Stunde wieder abklingen [Johnson, 2005]. Da bei Proband 11 in der dritten Simulation ab der letzten Verflechtungsstrecke eine ruckelnde Darstellung der Simulationsumgebung auftrat, wird vermutet, dass diese „nicht flüssige Bewegungsdarstellung“ den Effekt der Simulatorkrankheit bei dem Probanden verstärkt hat. Nachdem der Abbruch jedoch nur wenige hundert Meter vor dem tatsächlichen Ende der Simulationsstrecke stattfand und somit außerhalb des berücksichtigten Bereichs in der Ermittlung der fahrdynamischen Kenngrößen (siehe Unterabschnitt 5.2.3) liegt, floss dieses Szenario dennoch vollständig in den Auswertung mit ein.

4 Datenauswertung des subjektiven Befindens

Um das subjektive Befinden einheitlich zu erheben, wurde ein Fragebogen (siehe Anhang unter Abschnitt 10.3) entwickelt und die Antworten zu den Fragen über einen Interviewer aufgenommen.

Der Fragebogen hat sich in vier Teile gegliedert. Zu Beginn wurden allgemeine Daten zur Soziodemographie und zum Mobilitätsverhalten der Probanden abgefragt. Im zweiten Teil wurde auf das Fahrverhalten der VISSIM-Fahrzeuge in den einzelnen Szenarien eingegangen. Dabei wurden stets nach dem Abschluss eines Szenarios die Fragen zum subjektiven Befinden der Probanden bezüglich

- des Fahrkomforts im Allgemeinen
- des dynamischen Fahrverhaltens (Geschwindigkeits-, Beschleunigungs- und Bremsverhalten) der VISSIM-Fahrzeuge und
- des Abstandsverhaltens der VISSIM-Fahrzeuge

aufgenommen. Zusätzlich enthielt dieser Teil einen freien Bereich für optionale Anmerkungen der Probanden während der Fahrt, welche sich auf das Fahrverhalten der VISSIM-Fahrzeuge innerhalb eines Szenarios bezogen. Zur Beurteilung des dritten Szenarios wurden außerdem die letzten beiden Teile des Fragebogens aufgenommen. Dabei beinhaltete der dritte Teil allgemeine Fragen zum Fahrverhalten der Probanden und dem Fahrgefühl im Fahrsimulator. Der letzte Teil sollte Auskunft über den Informationsstand der Probanden zum Thema „automatisiertes Fahren“ liefern. Fragen der Probanden zu der Studie, deren Beantwortung eine Beeinflussung der Probanden (z.B. deren Fahrweise oder deren Antworten im Fragebogen) zur Folge haben hätte können, wurden erst nach Abschluss des Fragebogens beantwortet. Eine genauere Aufklärung über den Untersuchungsschwerpunkt dieser Studie und über das Thema „automatisiertes Fahren“ erfolgte ebenfalls erst nach Abschluss des Fragebogens. Somit konnte auch hier eine mögliche Beeinflussung bei Beantwortung des Fragebogens indiziert durch persönliche Präferenzen und Vorbehalte vermieden werden.

4.1 Soziodemographie und Mobilitätsverhalten

Die Akquisition der Probanden und die technische Betreuung des Fahrsimulators während der Probandenstudie wurde, durch das Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Graz unterstützt. Zu der in weiterer Folge beschriebenen Probandenzusammensetzung finden sich entsprechende Grafiken im Anhang unter Abschnitt 10.4.

In Summe nahmen 24 Personen an der Simulatorstudie teil. Dabei können keine Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit aller Fahrzeuglenker im österreichischen hochrangigen Straßennetz getroffen werden. Diese relativ geringe Anzahl an Testpersonen erlaubt lediglich eine qualitative Auswertung der über den Fragebogen aufgenommenen Antworten zum Fahrverhalten. Rund zwei Drittel der Probanden wurden aus einem bestehenden Probandenpool vom FTG generiert und haben daher bereits ein- oder mehrmals an Fahrsimulatorstudien des Instituts für Fahrzeugtechnik teilgenommen. Die restlichen Probanden konnten über Mundpropaganda am Institut für Straßen- und Verkehrswesen akquiriert werden. In der Altersverteilung war die Gruppe der 25- bis 34-Jährigen mit rund 50% der Probanden am stärksten vertreten. An der Studie nahmen keine Probanden über 65 Jahre teil.

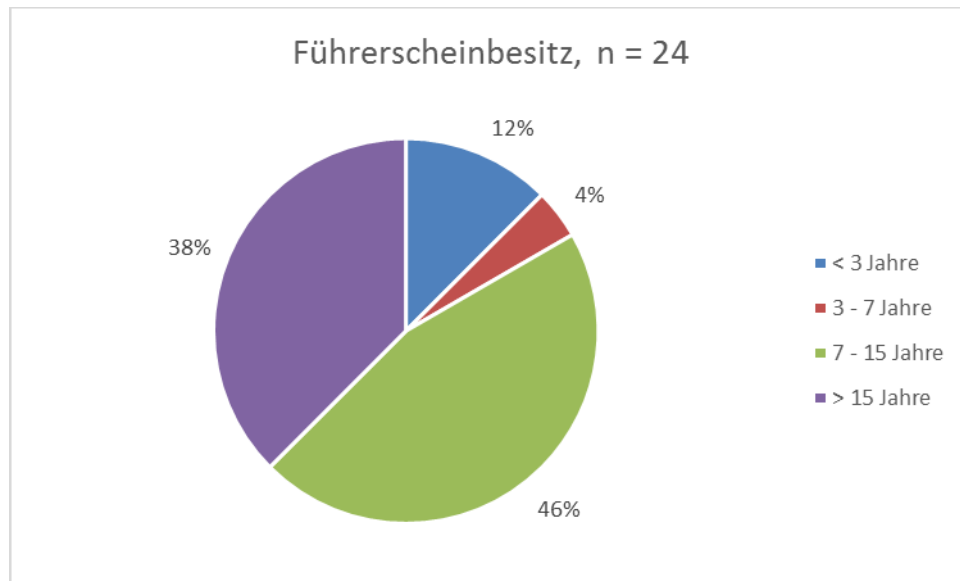


Abbildung 29 Zeitspanne des Führerscheinbesitzes

Abbildung 29 zeigt, dass mehr als 80% der Probanden den Führerschein bereits länger als 7 Jahre besaß. Allerdings wurde angenommen, dass die Jahresfahrleistung der Probanden mit dem Pkw mehr Einfluss auf die Fahrweise und das Fahrverhalten nimmt als die Zeitspanne des Führerscheinbesitzes. Aus diesem Grunde sollten die Probanden zusätzlich eine Schätzung ihrer Jahresfahrleistung mit dem Pkw (Abbildung 30) und eine Schätzung ihrer Jahresfahrleistung auf österreichischen Autobahnen und Schnellstraßen (Abbildung 31) abgeben.

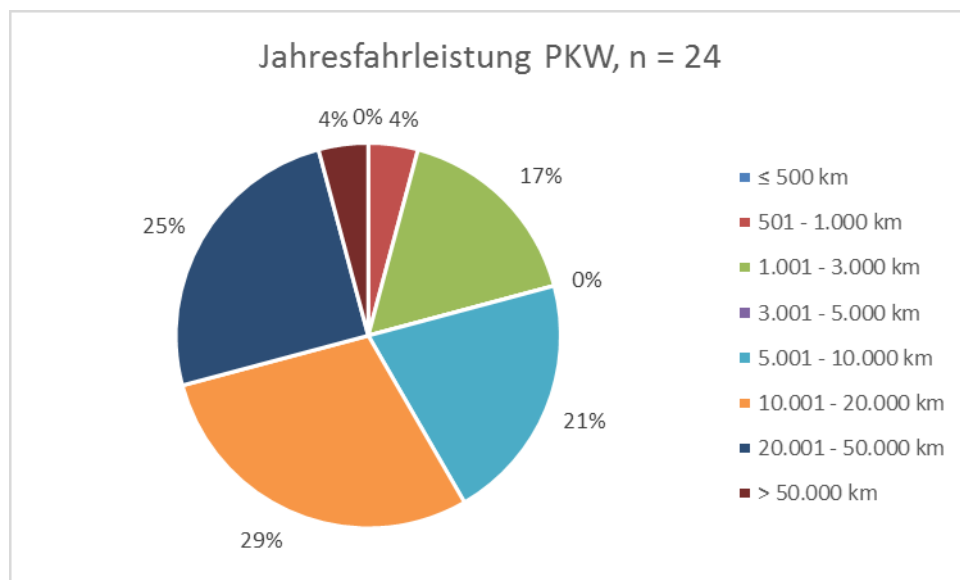


Abbildung 30 durchschnittliche Jahresfahrleistung mit dem Pkw

Der größte Teil der Probanden schätzte die eigene Jahresfahrleistung mit dem Pkw auf „10.001 - 20.000 km“ ein. Allerdings kamen die Kategorien „20.001 - 50.000 km“ und „5.001 bis 10.000 km“ auf annähernd dieselben Werte. Keiner der Probanden schätzte die eigene Jahresfahrleistung mit dem Pkw auf „kleiner 500 km“ oder „3.001 - 5.000 km“. Ein etwas ausgewogeneres Bild zeigten die Jahresfahrleistungen mit dem PKW auf Autobahnen und Schnellstraßen.

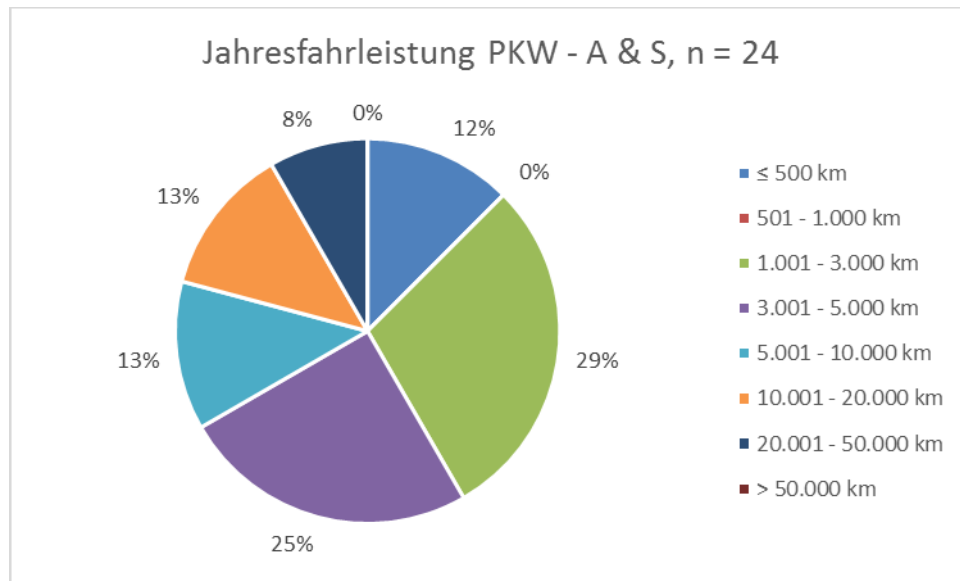


Abbildung 31 durchschnittliche Jahresfahrleistung auf Autobahnen und Schnellstraßen mit dem Pkw

Hier gaben in Summe mehr als 50% der Probanden an, entweder „1.001 – 3.000 km“ oder „3.001 – 5.000 km“ zu fahren. Die Kategorien „501 – 1.000 km“ und „> 50.000 km“ wurden von keinem Probanden genannt. Die restlichen Angaben zu den Jahresfahrleistungen verteilten sich nahezu gleichmäßig auf die verbleibenden Kategorien.

4.2 Fahrverhaltensbewertungen der Simulationsszenarien

Für die Fahrverhaltensbewertung der Szenarien standen den Probanden insgesamt sechs Abstufungsschritte (Auswahl zwischen „sehr unangenehm“ und „sehr angenehm“) zur Verfügung. Um numerisch vergleichbare Werte aus den Bewertungen zu erhalten, wurden die jeweiligen Angaben mit den in Tabelle 3 angeführten Gewichtungsfaktoren multipliziert.

Tabelle 3 Gewichtungsfaktoren der Antworten bei der Fahrverhaltensbewertung der Szenarien

Antwortmöglichkeit	Gewichtungsfaktor
Sehr unangenehm	-3
Unangenehm	-2
Eher unangenehm	-1
Eher angenehm	1
Angenehm	2
Sehr angenehm	3

Bei in Summe 24 Fragebögen ergeben sich somit mit den Gewichtungsfaktoren aus Tabelle 3 ein maximal zu erreichender Höchstwert von 72 Punkten und ein Tiefstwert von -72 Punkten. Der daraus entstandene Bewertungsbereich wurde, entsprechend den Antwortmöglichkeiten im Fragebogen, wie in Tabelle 4 unterteilt.

Tabelle 4 Ermittlung des durchschnittlichen Befindens

Gemittelter Wert	Befinden
-72 bis -49	Sehr unangenehm
-48 bis -25	Unangenehm
-24 bis -1	Eher unangenehm
0 bis 24	Eher angenehm
25 bis 48	Angenehm
49 bis 72	Sehr angenehm

Der Fahrkomfort weist bei allen drei Szenarien eine positive Tendenz auf (siehe Abbildung 32). Das Szenario SAE 0 wird von 25% der Probanden als „sehr angenehm“, 25% als „angenehm“ und von weiteren 25% der Probanden als „eher angenehm“ empfunden. Mit einem erreichten Wert von 27 Punkten wird dieses Szenario somit im Durchschnitt als „angenehm“ empfunden. Die beiden Szenarien mit dem automatisierten Fahrverhalten wurden durchschnittlich als eher angenehm beurteilt. Auffällig ist auch, dass keines der Szenarien von einem Probanden als „sehr unangenehm“ eingestuft wurde. Diese Beurteilungen könnten bei Erhöhung der Auslastungsgrade durchaus stärker variieren, wodurch sich ein anderes Bild bei den Vergleichen der Fahrkomforts ergeben könnte.

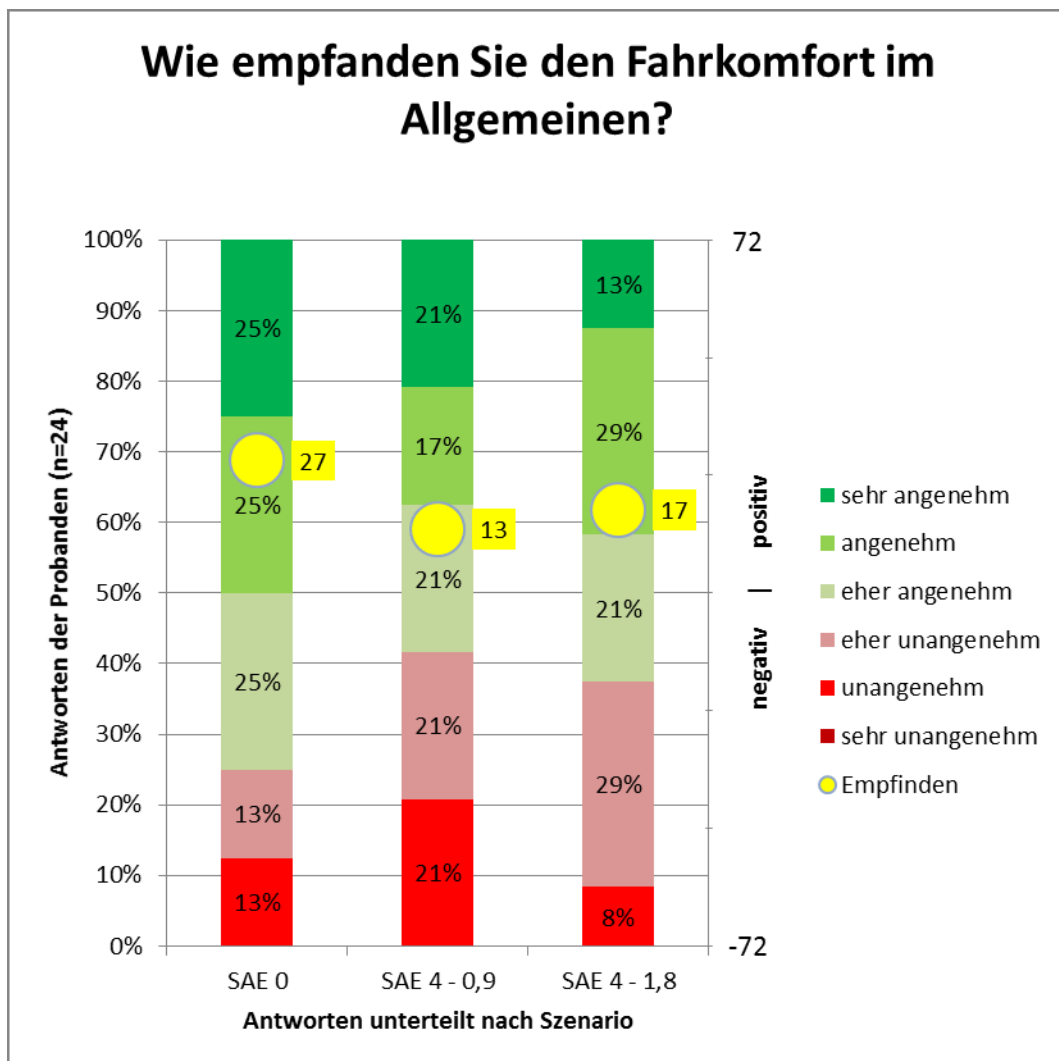


Abbildung 32 Beurteilung des Fahrkomforts

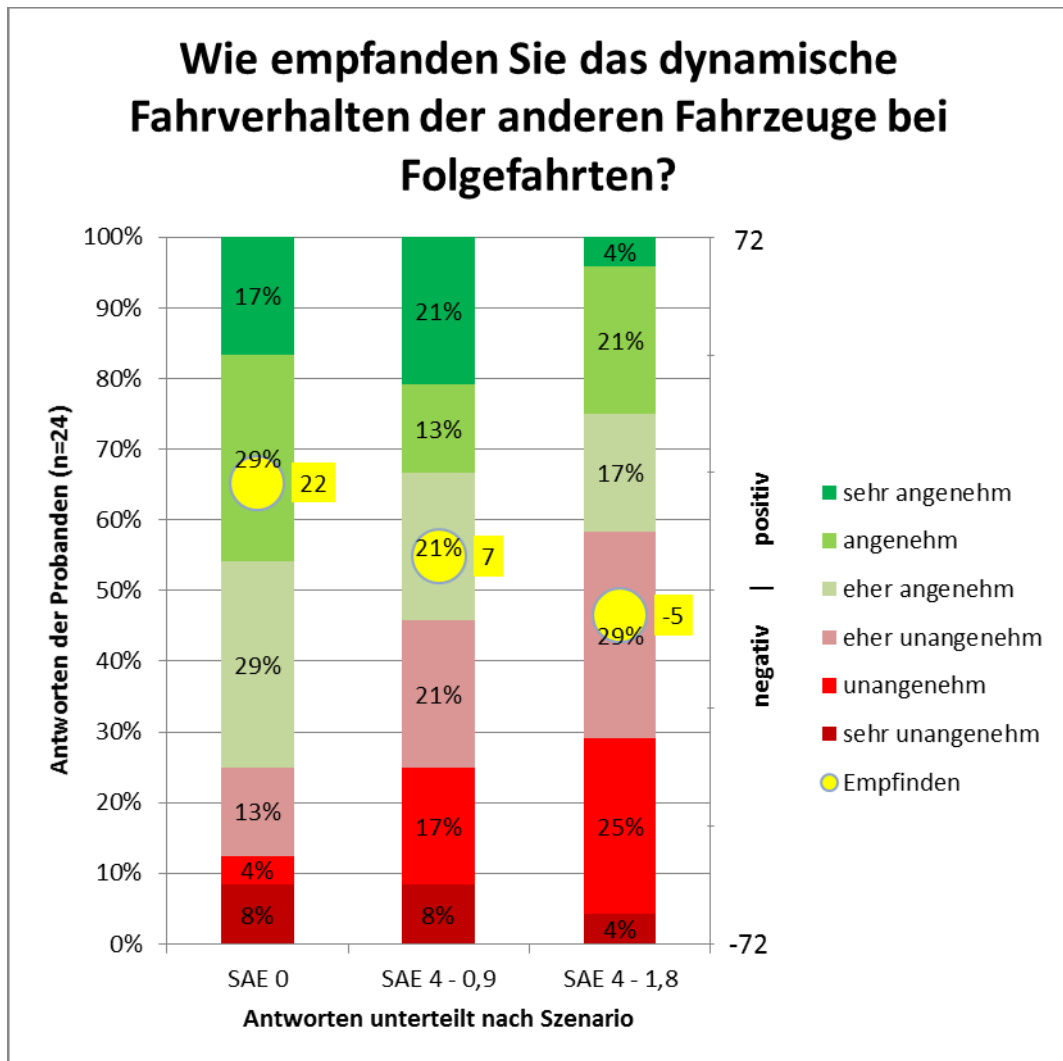


Abbildung 33 Beurteilung des dynamischen Fahrverhaltens bei Folgefahrten

Abbildung 33 zeigt, wie die Probanden das Geschwindigkeits-, Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten der VISSIM-Fahrzeuge bei Folgefahrten beurteilten. Das Szenario SAE0 wurde von der Mehrheit der Probanden als positiv bewertet. Die automatisierten Fahrverhalten hingegen wurden durchaus bereits differenzierter betrachtet. Rund 46% der Probanden gaben dem dynamischen Fahrverhalten in Szenario SAE4_0.9 eine negative Bewertung. Auffällig ist auch, dass obwohl im Szenario SAE4_1.8 höhere Sicherheitsabstände zwischen den VISSIM-Fahrzeugen eingehalten wurden, diese mehrheitlich als zumindest „eher unangenehm“ eingestuft wurden.

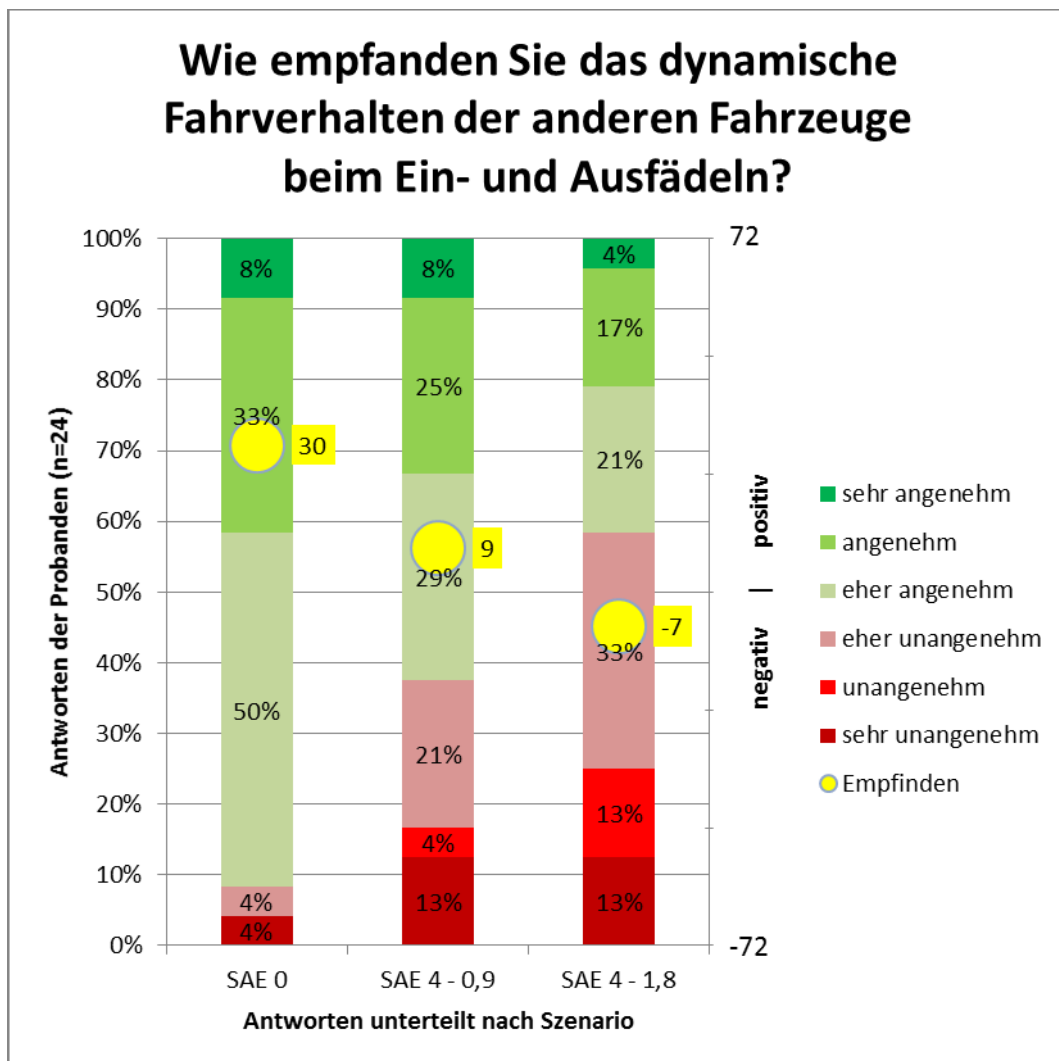


Abbildung 34 Beurteilung des dynamischen Fahrverhaltens beim Ein- und Ausfädeln

Das dynamische Fahrverhalten beim Aus- und Einfädeln der VISSIM-Fahrzeuge wird vor allem im Szenario mit dem menschlichen Fahrverhalten als „angenehm“ empfunden. Die Szenarien mit dem automatisierten Fahrverhalten schneiden, wie auch bei der Beurteilung des dynamischen Fahrverhaltens bei Folgefahrten, deutlich schlechter ab. Auch beim Ein- und Ausfädeln im Szenario SAE4_1.8 werden das Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhalten als „eher unangenehm“ eingestuft. Allerdings wird auch hier das automatisierte Fahren mit einem geringeren Sicherheitsabstand erneut besser beurteilt, als jenes mit einem höheren Sicherheitsabstand.

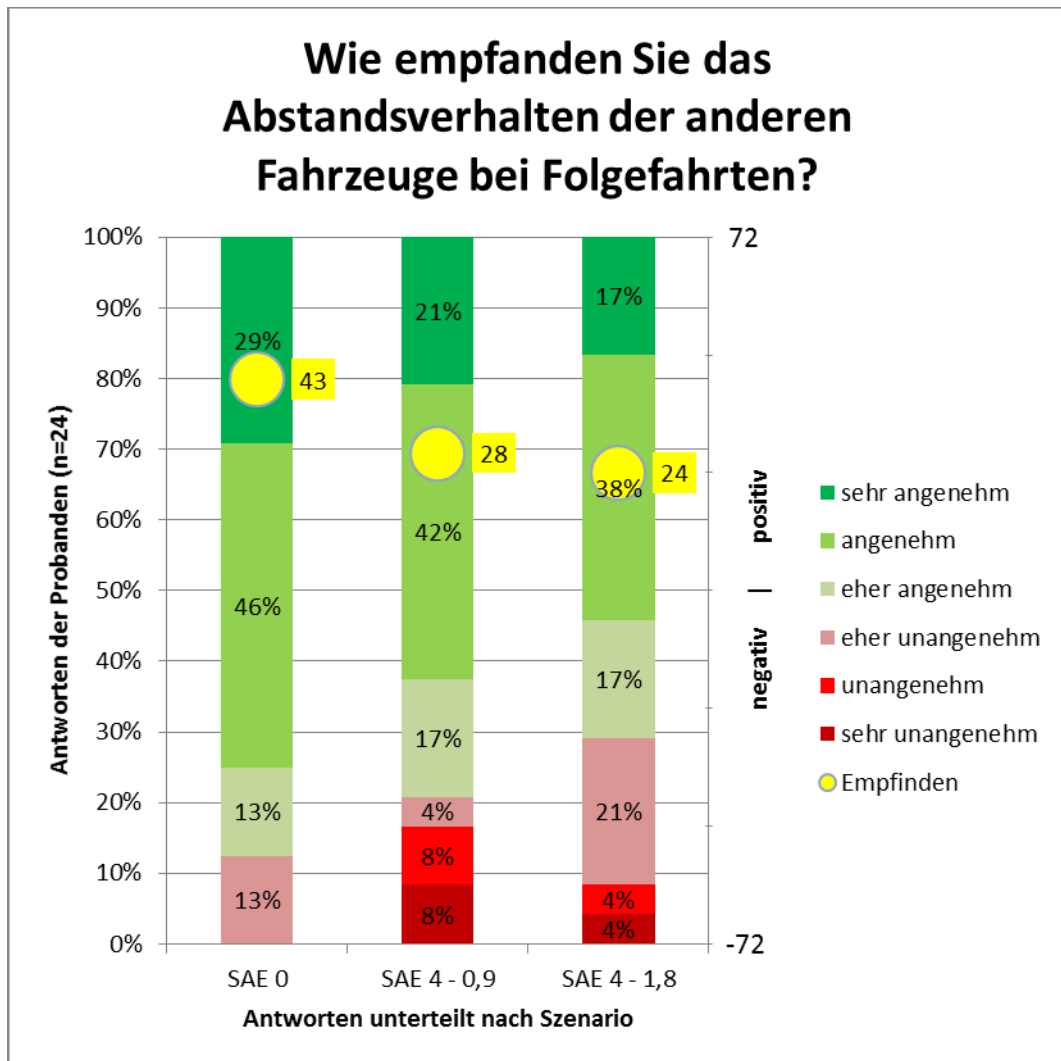


Abbildung 35 Beurteilung des Abstandsverhaltens bei Folgefahrten

Das Abstandsverhalten bei Folgefahrten wurde in allen drei Szenarien mehrheitlich als „angenehm“ beurteilt. In den beiden Szenarien mit automatisiertem Fahrverhalten wurde die höchstzulässige Geschwindigkeit von 130 km/h durch die VISSIM-Fahrzeuge nicht überschritten. Da die Wunschgeschwindigkeit bei vielen Probanden über dieser Geschwindigkeit lag, wurde das Ego-Fahrzeug der Probanden in diesen Szenarien seltener durch andere VISSIM-Fahrzeuge verfolgt. Lediglich wenn die Probanden durch andere Fahrzeuge blockiert (oder abgebremst) wurden, ergab sich die Möglichkeit, dass nachfolgende Fahrzeuge durch das Ego-Fahrzeug beeinflusst wurden. Durch die stochastische Verteilung der Wunschgeschwindigkeiten im Szenario SAE0 wurden die VISSIM-Fahrzeuge durchaus öfters durch das Ego-Fahrzeug beeinflusst. In der Bewertung der Abstände liegt dennoch das Szenario SAE0 deutlich vor den beiden SAE4 Szenarien und wurde von keinem Probanden als „unangenehm“ oder „sehr unangenehm“ empfunden.

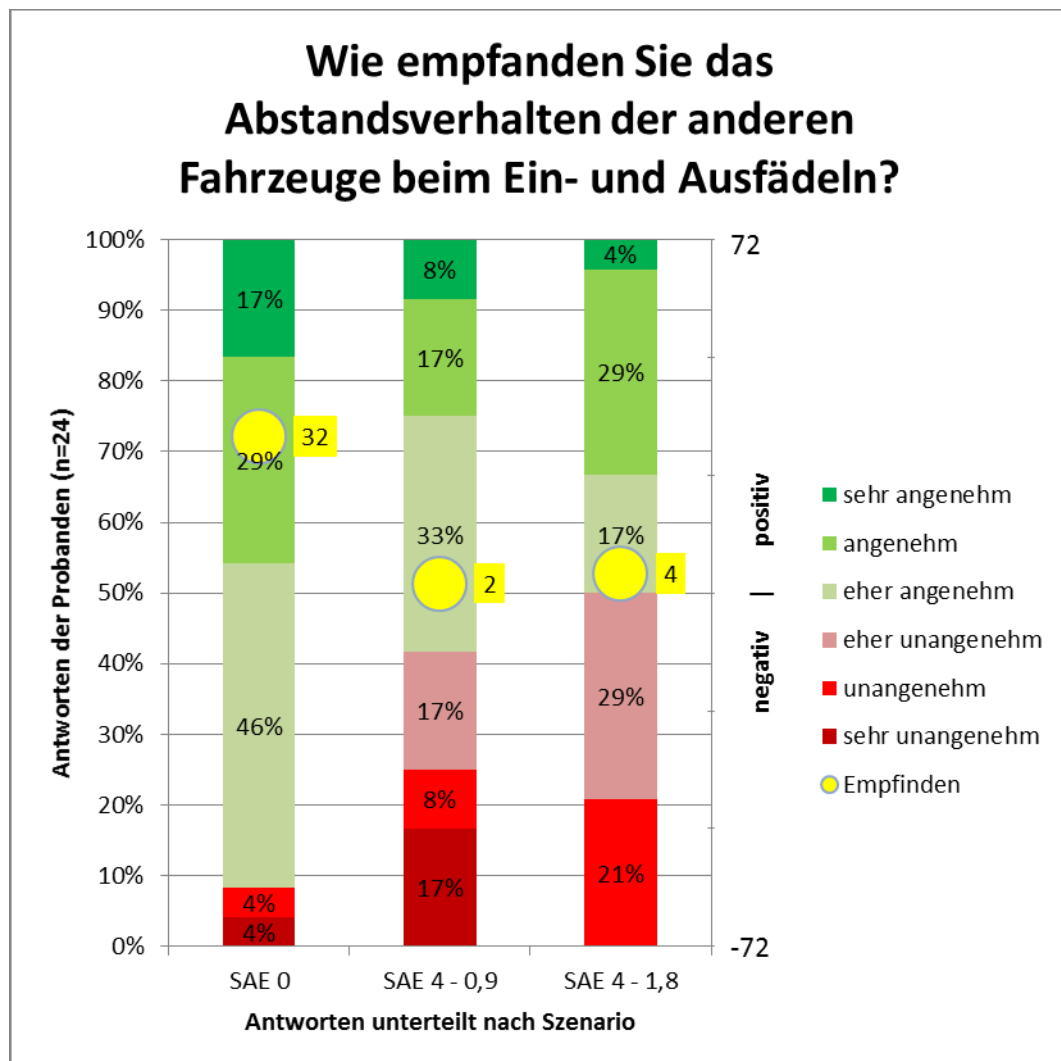


Abbildung 36 Beurteilung des Abstandsverhaltens beim Ein- und Ausfädeln

Beim Ein- und Ausfädeln der VISSIM-Fahrzeuge auf dem Fahrstreifen vor dem Ego-Fahrzeug fiel die Beurteilung des Abstandsverhaltens vor allem bei den beiden Szenarien mit einem Fahrverhalten entsprechend SAE level 4 deutlich schlechter aus. Lag die durchschnittliche Bewertung in Abbildung 35 noch im „angenehmen“ Bereich, so kann man eine positive Tendenz bei den beiden SAE4 Szenarien nur noch vage erahnen. Über 40% der Probanden gaben dem Szenario SAE4_0.9 eine schlechte Beurteilung, wobei rund 17% das Abstandsverhalten sogar als „sehr unangenehm“ empfanden. In Szenario SAE4_1.8 beurteilte zwar keiner der Probanden das Abstandsverhalten als „sehr unangenehm“ dafür wurde es aber in Summe von der Hälfte der Probanden als zumindest „eher unangenehm“ bis „unangenehm“ wahrgenommen. Das Szenario mit dem menschlichen Fahrverhalten wurde hingegen von über 90% der Probanden als zumindest „eher angenehm“ beurteilt.

4.3 Allgemeine Fragen zum Fahrsimulator

Über den dritten Teil des Fragebogens wurden allgemeine Fragen zum FASI unabhängig von den jeweiligen Szenarien ausgewertet. Dabei ist das Fahrgefühl im Fahrsimulator für mehr als 50% der Probanden jenem eines richtigen Pkws naheliegend (siehe Abbildung 37). Rund 12% geben an, dass sich das Fahrgefühl des Fahrsimulators nicht von einem realen Fahrzeug unterscheidet. 17% der Probanden merken deutliche Unterschiede und weitere 17% beurteilen das Fahrgefühl im FASI als nicht ident zu jenem eines richtigen Pkws. Im persönlichen Gespräch (welches in den Fragebögen nicht aufgenommen wurde) ging hervor, dass die Probanden mit schlechten Bewertungen des Fahrgefühls eine fehlende kinästhetische Wahrnehmung als primären Mangel empfanden. So gaben manche Probanden an, Probleme bei der Geschwindigkeitsabschätzung (sowohl der eigenen Geschwindigkeit, als auch jene der VISSIM-Fahrzeuge) zu haben. Defizite in der Visualisierung (nicht flüssige Bewegungen in der Bildabfolge) wurden ebenfalls vereinzelt angesprochen und eine Person bemängelte die Soundkulisse im FASI.

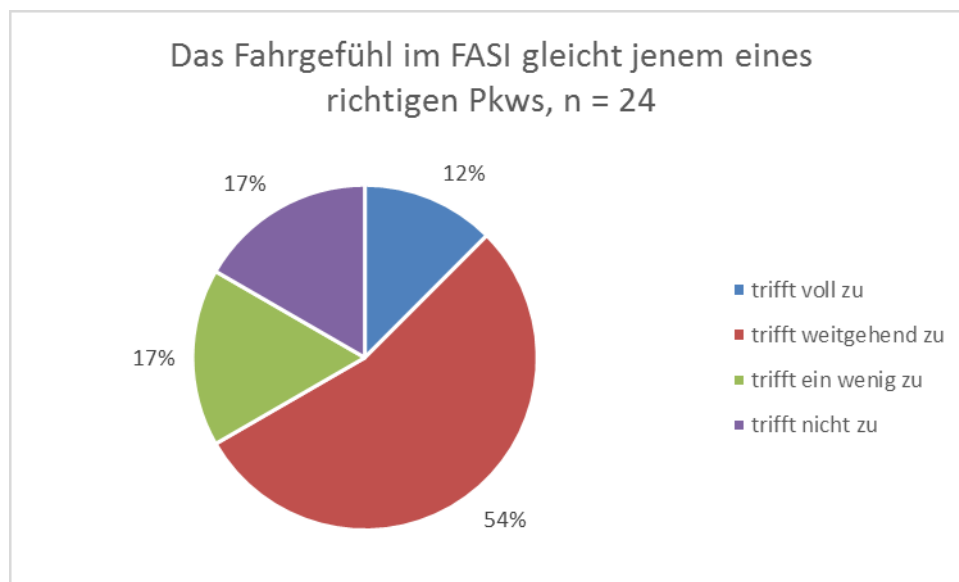


Abbildung 37 Beurteilung des Fahrgefühls im FASI bezogen auf den Vergleich mit einem richtigen PKW

Interessant waren auch die – in Abbildung 38 ersichtlichen – Angaben von rund einem Drittel der Probanden, welche teilweise bis vollständig zustimmten, dass sie ein anderes Fahrverhalten im Fahrsimulator gegenüber (ihrem „natürlichen“ Fahrverhalten auf) der Straße wahrgenommen haben. Immerhin ein Viertel der Probanden gab an, in der Probandenstudie keine Abweichung zwischen dem Fahrverhalten im FASI und ihrem „natürlichen“ Fahrverhalten auf der Straße bewusst festgestellt zu haben. Die restlichen rund 42% der Probanden gaben an, sich zumindest größtenteils gleich wie im realen Straßenverkehr verhalten zu haben.

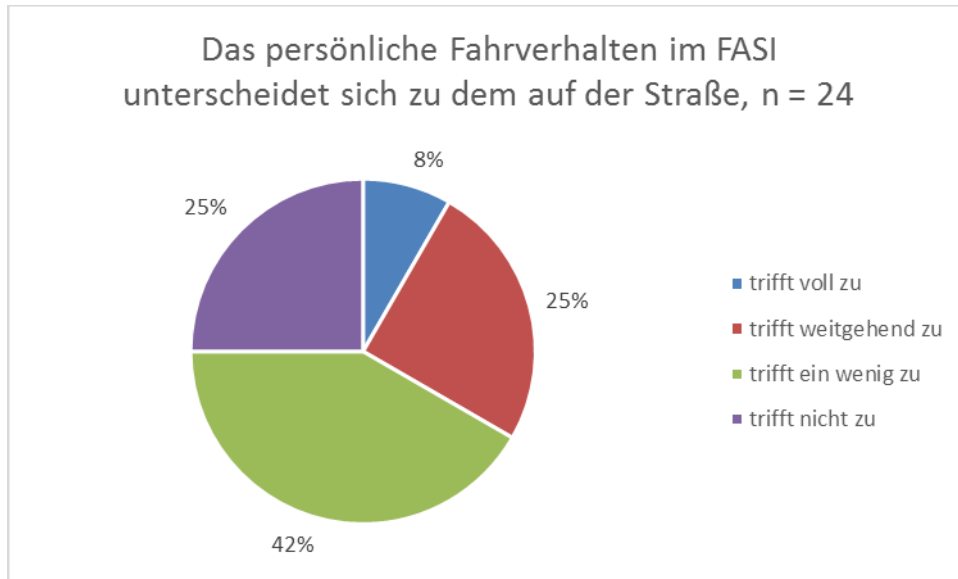


Abbildung 38 Beurteilung des persönlichen Fahrverhaltens im FASI verglichen mit jenem auf der Straße

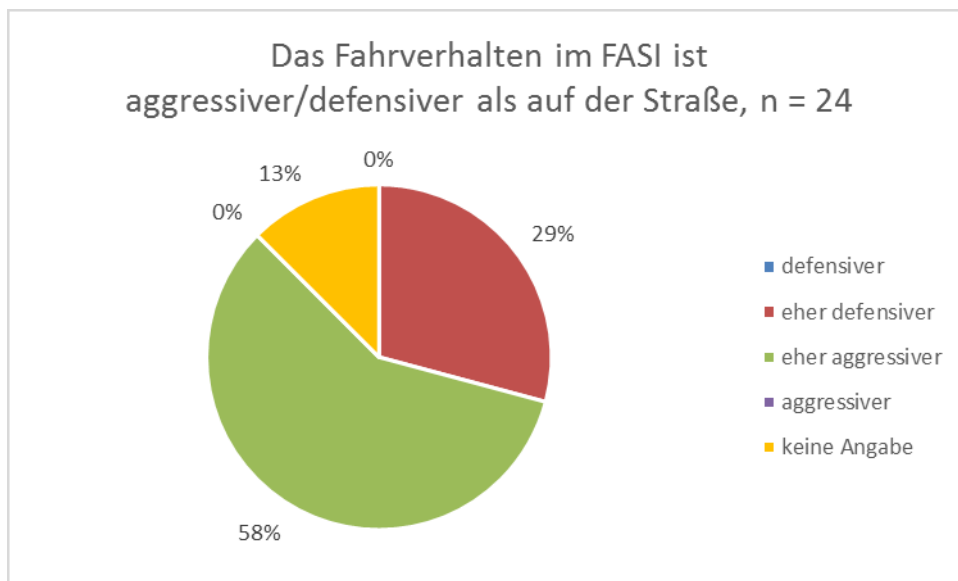


Abbildung 39 Einschätzung der Veränderung des persönlichen Fahrverhaltens im FASI verglichen mit jenem auf der Straße

Um dennoch potentielle Änderungen des Fahrverhaltens festhalten zu können, sollten die Probanden abschätzen, ob sie im Fahrsimulator aggressiver oder defensiver agiert hatten. Auffällig ist, dass keiner der Probanden eine starke Tendenz zu einer der beiden Richtungen angab, obwohl in der vorangegangenen Frage 8% der Probanden definitiv ein verändertes Fahrverhalten festgestellt haben. Rund 13% der Probanden wollten diesbezüglich keine Angabe machen.

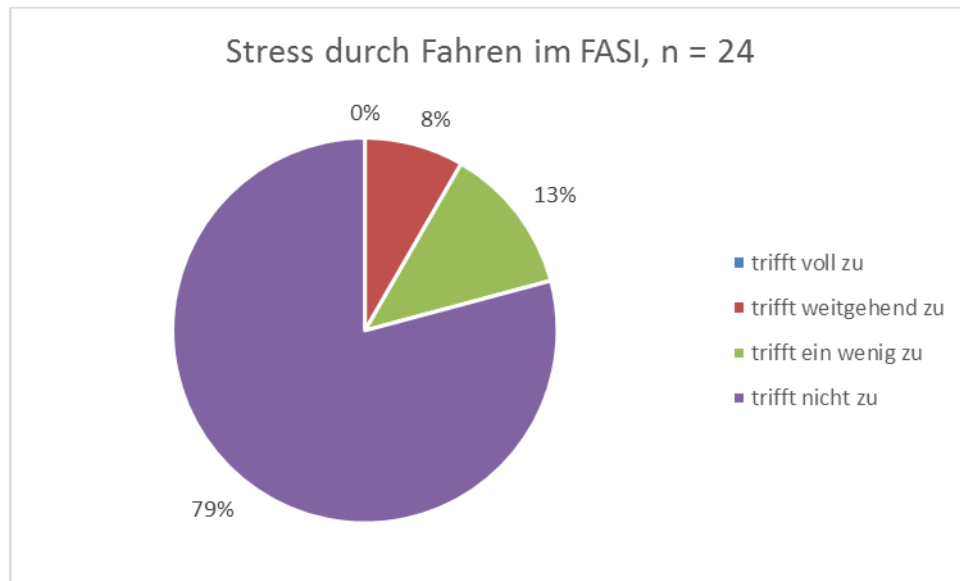


Abbildung 40 Aufkommender Stress durch die Fahrsimulatorstudie

Der Großteil (rund 80% aller Probanden) gab an, dass er durch die Fahrsimulatorstudie nicht gestresst war. Rund 13% der Probanden waren weitestgehend nicht gestresst. 8% gaben jedoch an, dass sie durch die Fahrsimulatorstudie ein wenig gestresst waren.

4.4 Allgemeine Fragen zum automatisierten Fahren

Die grafischen Auswertungen zu diesem Abschnitt können dem Anhang (siehe Unterabschnitt 10.4.3) entnommen werden. Da – wie in Abschnitt 4.1 beschrieben – viele der Probanden bereits zumindest einmal an einer Fahrsimulatorstudie des FTGs teilgenommen hatten oder über das Institut für Straßen- und Verkehrswesen der Technischen Universität Graz akquiriert wurden, ist es nicht verwunderlich, dass 17 Personen (was rund 70% der Teilnehmer entsprach) über die unterschiedlichen Automatisierungsstufen bereits vor Beginn der Studie Bescheid wussten. Von diesen 17 Probanden hatten 40% bislang keinen weiteren Kontakt mit automatisiertem Fahren (aF). Immerhin rund ein Drittel konnte bereits Fahrfunktionen des aF testen und ein derzeit hoher Anteil [eigene Einschätzung] von rund 24% gibt an, Fahrfunktionen des aF regelmäßig zu verwenden. Weiters gab ein Proband an, dass er sich noch nicht näher mit dem Thema automatisiertes Fahren beschäftigt hatte, jedoch bereits einmal Fahrassistenzsysteme testen konnte.

Mehr als 80% der Befragten schlossen aus, dass es durch den Einsatz von automatisierten Fahrzeugen zu einer Veränderung der Anzahl der von ihnen selbst mit dem Pkw zurückgelegten Wege kommt. Hingegen können sich aber rund 42% vorstellen, dass sich ihre zurückgelegten Fahrweiten durch automatisiertes Fahren erhöhen.

Nahezu 70% der Probanden wünscht sich bei dem nächsten Fahrzeug bereits Fahrassistenzsysteme.

5 Software zur Datenanalyse der objektiven Kenngrößen

Nachdem nicht nur das subjektive Empfinden für die Beurteilung des Fahrverhaltens von Bedeutung ist, soll in diesem Teil der Arbeit auf die Datenaufbereitung und die Datenanalyse der mitprotokollierten Fahrzeugdaten im Zuge der Fahrsimulatorstudie eingegangen werden. Diese Daten bieten die Möglichkeit, objektive Messgrößen zu analysieren und zu vergleichen. Im Zuge dieser Arbeit wurden folgende Kenngrößen untersucht:

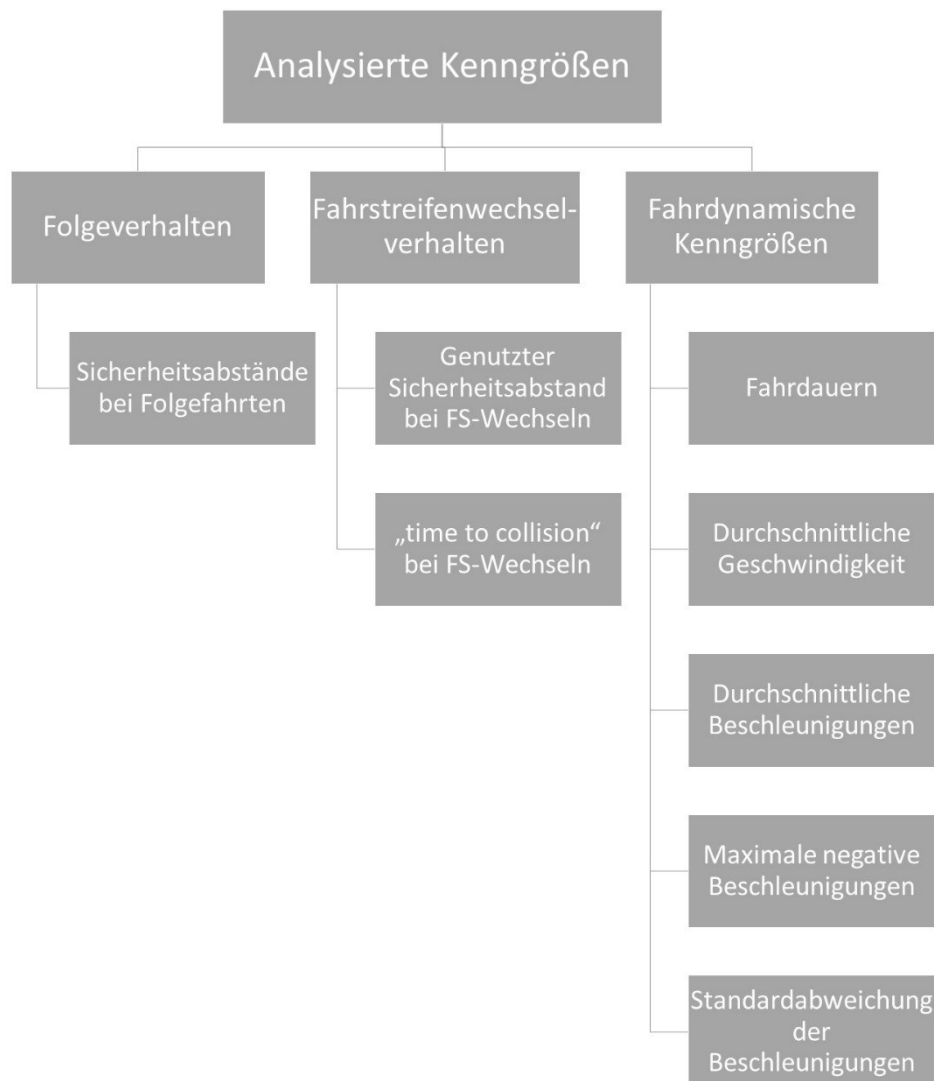


Abbildung 41 Übersicht der ausgewerteten Kenngrößen

Zur Auswertung der Daten wurde die Statistik-Software „R“ verwendet. R ist Teil des GNU-Projekts und ist unter den Bedingungen der „GNU General Public License“ der „Free Software Foundation“ erhältlich und somit als kostenfreies Produkt allen Personen zugänglich. Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde mit der R Version „R x64 3.4.1“ und der R-Studio Version 1.0.153 gearbeitet.

Die in Abbildung 42 gezeigte Baumstruktur der für die Analyse des Fahrverhaltens nötigen Skripte entstand aus dem Grundgedanken, die Fahrzeugprotokolldateien aus PTV VISSIM (*.fzp-Dateien) –

abhängig vom Probanden und dem jeweiligen Szenario – nacheinander einzulesen, die Daten aufzubereiten, zu filtern und in einer Datei auszugeben, welche für eine schnelle Generierung von Grafiken und Auswertungen herangezogen werden kann. Dabei sollten die einzelnen Arbeitsschritte zu einem späteren Zeitpunkt wiederholt werden können, ohne jedes Mal die großen Datenmengen der *.fzp-Dateien einlesen und bearbeiten zu müssen. Aus diesem Grunde wurde beschlossen, ein steuerndes Skript zu erstellen, in welchem angegeben wird, welche Skripte (und somit welche Aktionen) ausgeführt werden sollen. Dieses Skript heißt „Steuerungsskript.R“ und wird im Unterabschnitt 5.2.1 beschrieben.

In den beiden unten gezeigten Abbildungen (Abbildung 42 und Abbildung 43) soll ein genereller Überblick über die im Zuge dieser Auswertungen erstellten R-Skripte, deren Inhalte und deren Outputs gegeben werden. Einzelne Teile können dem Anhang (siehe Abschnitt 10.5) entnommen werden. Der gesamte Code findet sich zudem im digitalen Anhang.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Inhalte der einzelnen Skripte dargestellt und beispielhaft werden die jeweiligen Skriptteile anhand von Pseudo-Code erklärt. Die Namensgebung von Variablen und Dateien wurde für eine Erhöhung der Lesbarkeit und des Verständnisses teilweise vereinfacht oder abgeändert und kann somit Abweichungen zu jenen in den R-Skripten enthalten, was jedoch nicht zu Lasten der Nachvollziehbarkeit geht.

5.1 Struktur der Auswertungssoftware

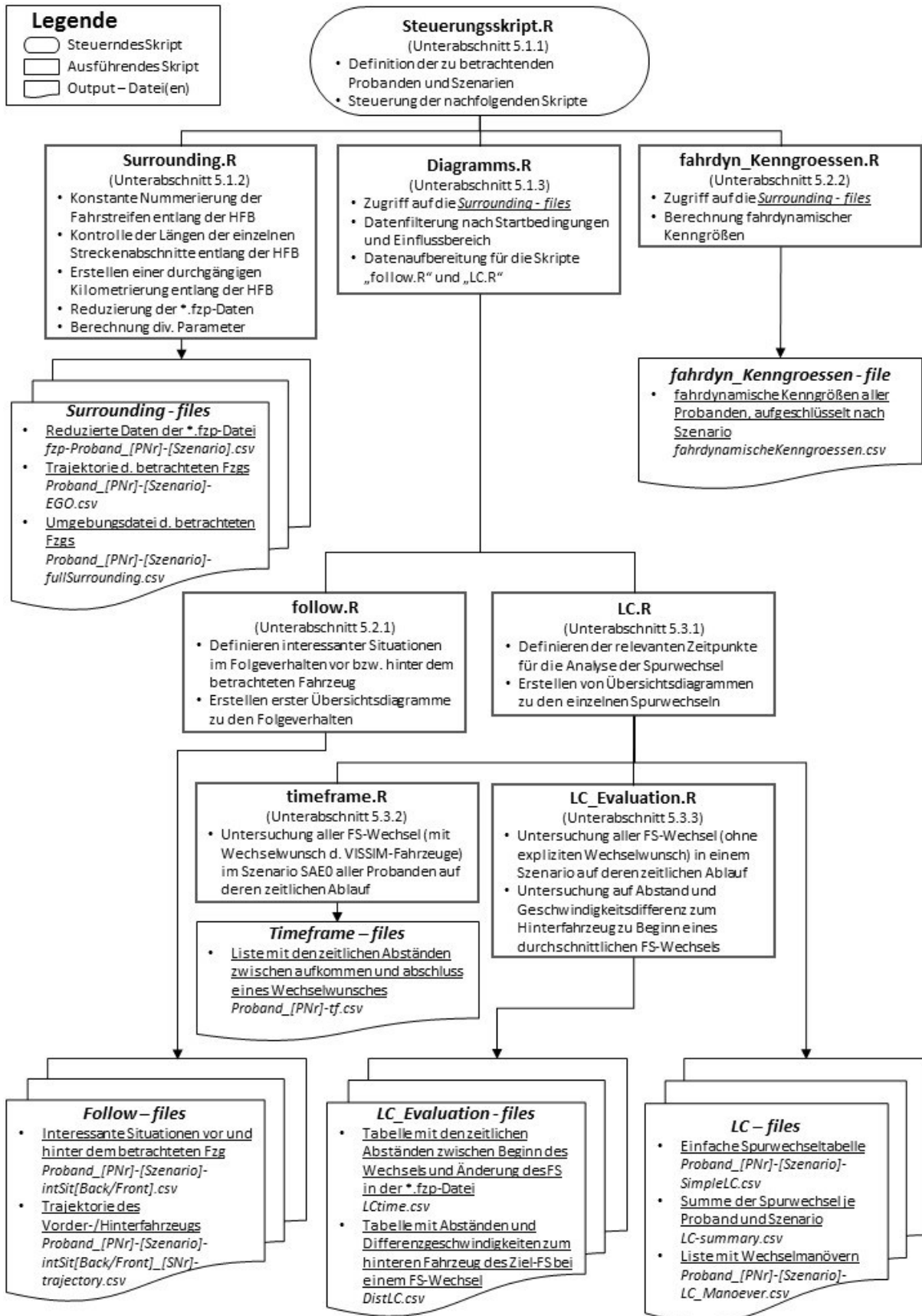


Abbildung 42 R-Skripte für die Analyse des Folge- (follow) und Fahrstreifenwechselverhaltens (lane change - LC)

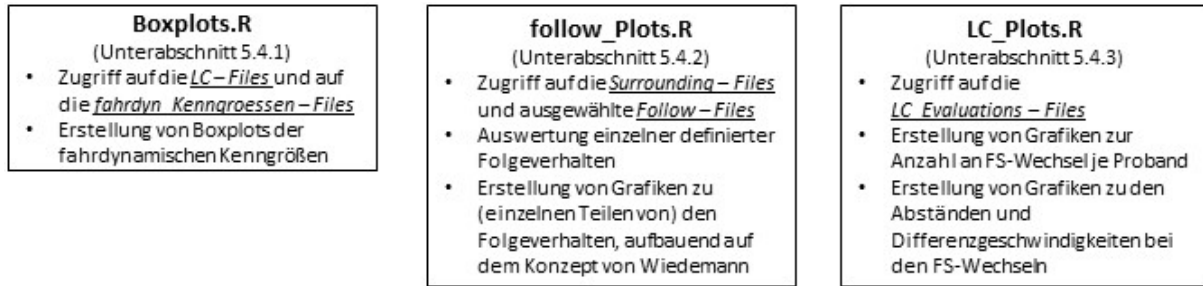


Abbildung 43 Ergänzende R-Skripte, welche nicht über "Steuerungsskript.R" gesteuert wurden

5.2 Vorbereitung der Daten für die Auswertung

Wie im Unterabschnitt 3.1.1 beschrieben, werden die Daten aller Fahrzeuge im VISSIM-Modell zeitdiskret in den *.fzp-Dateien mitprotokolliert. Da jedoch die Beschleunigungsdaten vom Ego-Fahrzeug nicht in dem Fahrzeugprotokoll enthalten sind, wurden diese im Zuge der vorbereitenden Datenaufbereitung im Skript „Surrounding.R“, wie im Flussdiagramm unter Abbildung 46 gezeigt, angenähert.

5.2.1 Steuerungsskript.R – steuerndes Skript

Die primäre Funktion dieses Skripts beschränkt sich auf die Steuerung der nachfolgenden, ausführenden Skripte. Dabei werden alle erforderliche *R Packages* geladen und es erfolgt eine Abfrage der grundlegenden Daten für die nachfolgenden Analysen. Zusätzlich wird in diesem Skript definiert, welchem Fahrzeugtyp das Ego-Fahrzeug zugewiesen ist. Auf dieser Information bauen alle weiteren Auswertungen auf.

Bei einer etwaigen Weiterverwendung dieser Skripte ist zu vermerken, dass die einzelnen Skripte relative Pfade beinhalten, welche vom gesetzten Arbeitsverzeichnis in diesem Skript ausgehen.

Unmittelbar nach dem Start dieses Skripts werden einige Eingaben von der Person, welche die Auswertungen gestartet hat (im weiteren „User“ genannt), gefordert:

```
start_Proband <- input „Start bei dem Probanden mit der Nummer =“

last_Proband <- input „Ende bei den Probanden mit der Nummer =“

all_Szen <- input (y/n) „Alle Szenarien der jeweiligen Probanden
untersuchen?“

if all_Szen = „NO“:
  Szenario_Nr <- input „Welches Szenario soll untersucht werden? -
  Nummer = “
end of if

doSkripts <- input „Welche Skripte sollen gestartet werden?“
```

Zum Teil wurde jedoch neben der Konsoleneingabe durch den User auch auf (Java-) Dialogboxen gesetzt, um schnelle standardisierte Antworten zu erhalten (siehe Abbildung 44).

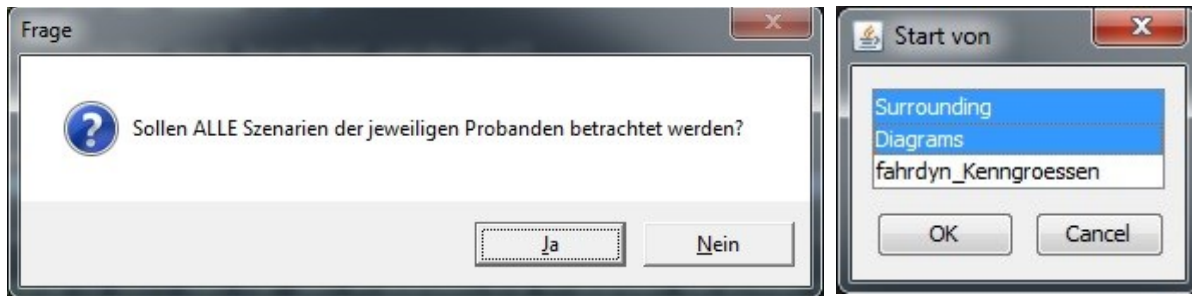


Abbildung 44 Beispielhafte Dialogboxen um standardisierte Antworten zu erhalten

Als primäre steuernde Funktion dieses Skripts dient jedoch eine Schleife über die gewählten Probanden und die zuvor als „zu untersuchen“ definierten Szenarien. Da die Pfade zu den *.fzp-Dateien in den einzelnen Szenarien eines Probanden variieren, ist es nötig zu definieren, welches Szenario aktuell aufgerufen werden soll. Das tatsächliche Einlesen erfolgt jedoch erst im jeweiligen nachfolgenden Skript.

```

for each proband_Nr in start_Proband to last_Proband:
  if all_Szen = "YES":
    for each Szenario_Nr in 1 to 3:
      if any doSkripts = "Surrounding":
        start "Surrounding.R"
      end of if

      if any doSkripts = "Diagrams":
        start "Diagrams.R"
      end of if

      if any doSkripts = "fahrdyn_Kenng":
        start "fahrdyn_Kenngroessen.R"
      end of if
    end of for
  else:
    if any doSkripts = "Surrounding":
      start "Surrounding.R"
    end of if

    if any doSkripts = "Diagrams":
      start "Diagrams.R"
    end of if

    if any doSkripts = "fahrdyn_Kenng":
      start "fahrdyn_Kenngroessen.R"
    end of if
  end of if else
end of for

```

An dieser Stelle bleibt anzumerken, dass sich in dem Code Hinweise befinden, welche auf mehr als 24 Probanden hindeuten. Dabei bleibt festzuhalten, dass es 24 Testpersonen bei der Fahrsimulatorstudie gab. Zusätzlich zu diesen 24 Testpersonen wurden noch weitere virtuelle

Probanden ausgewertet, um einen Vergleich zu den Fahrverhalten der VISSIM-Fahrzeuge zu erhalten. Als Datenbasis für diese virtuellen Probanden wurden die *.fzp-Dateien einer der natürlichen Testpersonen herangezogen. Dabei wurden die Auswertungen jedoch nicht für die ID des Ego-Fahrzeugs gestartet, sondern für die IDs von VISSIM-Fahrzeugen. Hierfür wurde eine einfache Abfrage in die zuvor gezeigte Schleife über die Probanden implementiert, die wie folgend aussieht:

```
if proband_Nr >= 25:
    fasi_ID ← input „Welche Fzg-ID soll betrachtet werden?“
end of if
```

In den Skripten wurde somit anstelle des Ego-Fahrzeugs das jeweils betrachtete VISSIM-Fahrzeug ausgewertet. Die Bezeichnungen Ego-Fahrzeug bzw. fasi_ID beziehen sich somit nicht auf das virtuelle Fahrzeug, welches durch einen Probanden (über den FASI) gesteuert wurde, sondern auf VISSIM-Fahrzeuge, die über verschiedene Fahrverhaltensmodelle auf die Umgebung reagieren. Die in den Skripten angeführten Bezeichnungen (z.B. fasi_ID etc.) wurden dahingehend nicht ausgebessert.

5.2.2 Surrounding.R – Datenreduzierung

Das Surrounding-Skript bildet die Grundlage für alle weiteren Skripte und Berechnungen.

Zunächst wurden die gesamten erforderlichen Daten der *.fzp-Datei (siehe Unterabschnitt 3.1.1 – Tabelle 1) in R eingelesen und einem *data frame*⁶ (kurz df), welcher ebenfalls „fzp“ benannt wurde, zugewiesen.

Da im Falle einer Untersuchung eines virtuellen Probanden bereits im Skript „Steuerungsskript.R“ die Fahrzeug-ID definiert wurde, wurde zu Beginn des „Surrounding.R“ Skripts nochmals überprüft, welcher Proband und gegebenenfalls welche Fahrzeug-ID ausgewertet werden sollte. Für den Fall, dass es sich um einen virtuellen Probanden handelte, wurden die Fahrzeugdaten der zuvor definierten Fahrzeug-ID aus dem *fzp - data frame* ausgelesen. Für die Auswertung natürlicher Testpersonen (Proband 1 bis 24) wurde zunächst überprüft, ob dem Ego-Fahrzeug der Fahrzeugtyp „1“ zugewiesen wurde, anhand dessen die Fahrzeug-ID des Ego-Fahrzeugs bestimmt werden konnte. In Summe fand die Zuweisung des Fahrzeugtyps „1“ zum Ego-Fahrzeug bei vier Szenarien (bei unterschiedlichen Probanden) nicht statt. Da sich jedoch schnell herausstellte, dass das Ego-Fahrzeug in allen Simulationen als erstes in das Modell geladen wurde und dadurch stets die ID 1 zugewiesen bekam, wurde in diesen Fällen die ID nicht automatisiert über den Fahrzeugtyp sondern direkt zugewiesen. In allen Auswertungen der Probanden 1 bis 24 wurde jedoch überprüft, ob das betrachtete Fahrzeug (ID = 1) in den ersten 5 Sekunden eine Geschwindigkeit kleiner 1 km/h besitzt. Da alle VISSIM-Fahrzeuge ab dem Zeitpunkt des Zuflusses in die Simulation eine definierte Geschwindigkeit größer 80 km/h besaßen (und sich im Bereich der Zuflüsse keine Aufstauung des Verkehrs abzeichnete), konnte somit ausgeschlossen werden, dass es sich bei dem betrachteten Fahrzeug um das Ego-Fahrzeug handelte.

Um eine Auswertung der Folge- und Spurwechselverhalten zu ermöglichen, war es nötig, über die gesamte (Probanden-) Fahrstrecke eine durchgängige Kilometrierung zu schaffen. Ursprünglich wurde angedacht, die Streckenlängen der einzelnen Strecken und Verbindungsstrecken in dem VISSIM-Netz automatisiert über den nachfolgend angeführten Code zu ermitteln, allerdings ergaben sich bei einem Test über mehrere Szenarien mehrerer Probanden schwankende Streckenlängen.

⁶ Ein *data frame* ist in R eine Matrix, welche Spalten mit unterschiedlichen Modi erlaubt.

Durch diese Unregelmäßigkeiten (und aufgrund der geringen Anzahl an Strecken und Verbindungsstrecken in diesem Netz) wurde beschlossen, die exakten Streckenlängen aus der VISSIM-Modellierung auszulesen und manuell in eine *.csv-Datei (trackSequence.csv) aufzunehmen. Daraus ergaben sich exakte Streckenlängen über alle Probanden und Szenarien für die Berechnungen, welche keiner Schwankung unterlagen. Dennoch wurde in dem Skript eine Kontrollfunktion eingerichtet, die überprüfte, ob irgendein Fahrzeug eine Position auf der Strecke besitzt, welche auf eine größere Streckenlänge hindeutet, als in der *.csv-Datei angegeben wurde.

Bei größeren Strecken- bzw. Verbinderszahlen in einem Netz, sowie höheren Verkehrsflüssen und längeren Laufzeiten der Simulation(en) kann jedoch auch eine automatisierte Auslesung der Streckenlängen sinnvoll sein. Diese kann beispielsweise wie folgt umgesetzt werden:

```
define variable tracklength as an empty data frame with five columns
called roadwayNumber, minPos, maxPos, length, absoluteEndLength
define variable trackSequence as an empty data frame
define variable trajectory as an empty data frame

trajectory ← order all data of *.fzp where ID = fasi_ID by
simulationSecond

for each line in trajectory:
  if current row <df trajectory, column roadway> uneven previous
  row <df trajectory, column roadway>:
    add current row <df trajectory, column roadway> to
    trackSequence
  end of if
end of for

for each segment in trackSequence:
  add a new row in tracklength with
  roadwayNumber ← current<segment> in trackSequence
  minPos ← minimal position of all vehicles in *.fzp where
  roadway = current<segment> in trackSequence
  maxPos ← maximal position of all vehicles in *.fzp where
  roadway = current<segment> in trackSequence
  length ← current<maxPos> in tracklength - current<minPos> in
  tracklength
  absoluteEndLength ← previous<absoluteEndLength> in
  tracklength + current<length> in tracklength
end of for
```

Optional kann bei der zuvor beschriebenen Methode ebenfalls die Fahrstreifenanzahl ermittelt werden und bei Hinzukommen eines weiteren Fahrstreifens (z.B. Beschleunigungs- oder Verzögerungsfahrstreifen) eine gleichbleibende Nummerierung gewährleistet werden. Dies ist deshalb notwendig, weil sich in den durch VISSIM aufgezeichneten *.fzp-Dateien zusätzliche Ein-, Aus- und Verflechtungsstrecken als „zusätzliche Fahrstreifen“ vorne in der Fahrstreifennummerierung einordnen. Dadurch entsteht im Übergang zwischen den Verbindern und der neuen Strecke (mit mehr Fahrstreifen) in den protokollierten Daten ein künstlicher Fahrstreifenwechsel, welcher die

Ergebnisse verfälscht. Durch die Anpassung der Fahrstreifennummerierung konnte diese Fehlerquelle behoben werden.

In der `trackSequence.csv`, welche die exakten Streckenlängen enthält, wurde für die Anpassung der Fahrstreifennummerierung außerdem eine Spalte mit der Anzahl an Fahrstreifen je Strecke und Verbindungsstrecke (im Weiteren als „laneNumber“ bezeichnet) eingefügt. Daraus kann eine direkte Zuordnung der Streckennummern mit vier (oder mehr) Fahrstreifen getroffen werden. Für die Umnummerierung dieser Strecken wurde wie folgt vorgegangen:

```

if „newLaneNumber.csv“ not exists:
  lines_4 ← all data of “trackSequence.csv” where laneNumber > 3

  for each row in fzp:
    if currentrow<df fzp, column roadway> = any roadway of
      lines_4:
        currentrow<df fzp, column laneNumber> ←
          currentrow<df fzp, column laneNumber> - 1
    end of if
  end of for

  write table “newLaneNumber.csv” with data from fzp
else:
  fzp ← read table “newLaneNumber.csv”
end of if else

```

Da dieser Bearbeitungsschritt mit einem größeren Zeitaufwand verknüpft war, wurden nach Abschluss der Fahrstreifennummernanpassung die Daten in einer eigenen *.csv Tabelle abgespeichert. Aus dieser können, bei erneuter Ausführung des Skripts, alle in weiterer Folge benötigten Daten (ersichtlich in Unterabschnitt 3.1.1 – Tabelle 1, inklusive der angepassten FS-Nummerierung) schnell eingelesen werden und die Berechnung kann um die Zeitspanne der Anpassung der FS-Nummern verkürzt werden.

Ein erster Filter für die Reduktion der Datenmengen in dem `fpz` – *data frame* war die Einführung einer „Startgeschwindigkeit“ von 80 km/h, welche das Ego-Fahrzeug überschreiten musste. Der Zeitpunkt, an dem die erste Überschreitung stattfand, wurde als Startzeitpunkt für alle weiteren Auswertungen gehandhabt. Das bedeutet, dass alle Daten, welche vor der entsprechenden Simulationssekunde aufgezeichnet wurden, in den weiteren Skripten nicht mehr aufschienen oder ausgewertet wurden. Anlass für die Einführung dieser Startbedingung war, dass ein (unter Abschnitt 3.3 beschriebenes) „Stehen“ auf einem Fahrstreifen der Autobahn in einem nicht-überlasteten Streckenabschnitt nicht realitätsnahe ist. Zudem ist der Start (das erste Losfahren) des Ego-Fahrzeugs weder für das Folgeverhalten noch für das Spurwechselerhalten relevant.

Als nächster Schritt wurden weitere Spalten dem *fzp* - *data frame* hinzugefügt, welche durch die Berechnungen

- der jeweiligen Nettoabstände der einzelnen VISSIM-Fahrzeuge zum Ego-Fahrzeug,
- der Distanzen der vorderen und hinteren Stoßstangen zwischen den VISSIM-Fahrzeugen und dem Ego-Fahrzeug
- der absoluten Position der vorderen und hinteren Stoßstange entlang der Kilometrierung eines jeden Fahrzeugs
- der absoluten Position der Fahrzeugmitte entlang der Kilometrierung eines jeden Fahrzeugs
- der Differenzgeschwindigkeit des jeweiligen Fahrzeugs bezogen auf die Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs

befüllt wurden.

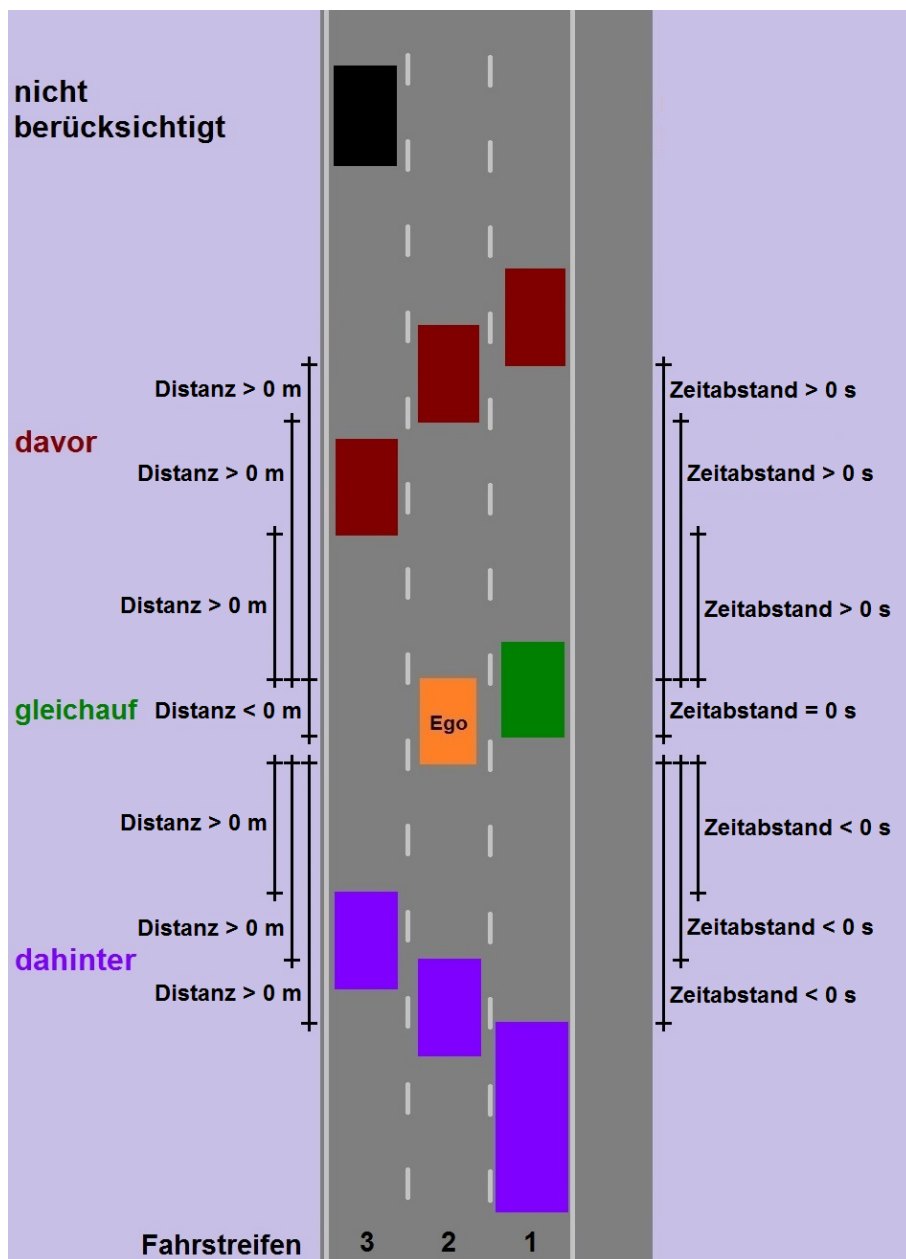


Abbildung 45 Schema der berücksichtigten Fahrzeugpositionen und -distanzen

Nachdem nun sowohl die absoluten Fahrzeugpositionen entlang der Kilometrierung, als auch die Distanzen zum Ego-Fahrzeug bekannt waren, wurde eine weitere Selektion vorgenommen. In einem

neuen *data frame* (in weiterer Folge „fullSurrounding“ genannt) wurden nur mehr jene Fahrzeuge eines jeden Fahrstreifens aufgenommen, welche dem Ego-Fahrzeug am nächsten waren (siehe Abbildung 45 – farbig dargestellte Fahrzeuge). Dabei wurden je Fahrstreifen sowohl jene Fahrzeuge, welche sich am nächsten vor als auch hinter dem Ego-Fahrzeug befanden, ermittelt. Falls sich ein Fahrzeug auf gleicher Höhe mit dem Ego-Fahrzeug befand (Distanz < 0 m), wurden diese Fahrzeuge zusätzlich in den *fullSurrounding – data frame* (im Weiteren mit *fS* abgekürzt) mit aufgenommen.

Für alle Fahrzeuge im *fS* wurde anschließend untersucht, ob die Distanzen zum Ego-Fahrzeug abnahmen. Sofern sich die Distanzen verkürzten, wurde die „time to collision“ (ttc) für die entsprechenden Fahrzeuge in jedem Zeitschritt der Annäherung an das Ego-Fahrzeug berechnet. Hierfür wurde die aktuelle Distanz zwischen dem entsprechenden VISSIM-Fahrzeug und dem Ego-Fahrzeug durch deren Geschwindigkeitsdifferenz dividiert. Die daraus resultierende Zeit entspricht jener Zeit, bei der (ohne einer Änderung der Geschwindigkeiten) die Distanz zwischen den beiden Fahrzeugen gleich Null werden würde.

Abschließend wurden die noch fehlenden Beschleunigungen (und Verzögerungen) des Ego-Fahrzeugs, wie in Abbildung 46 dargestellt, im *fS* ergänzt.

Um diese reduzierten und vervollständigten Datensätze für alle weiteren Auswertungen schnell laden zu können, wurde dieser *data frame* als eine *.csv-Tabelle abgespeichert. Dabei wurde für jeden Probanden und jedes Szenario jeweils eine eigene Datei erstellt.

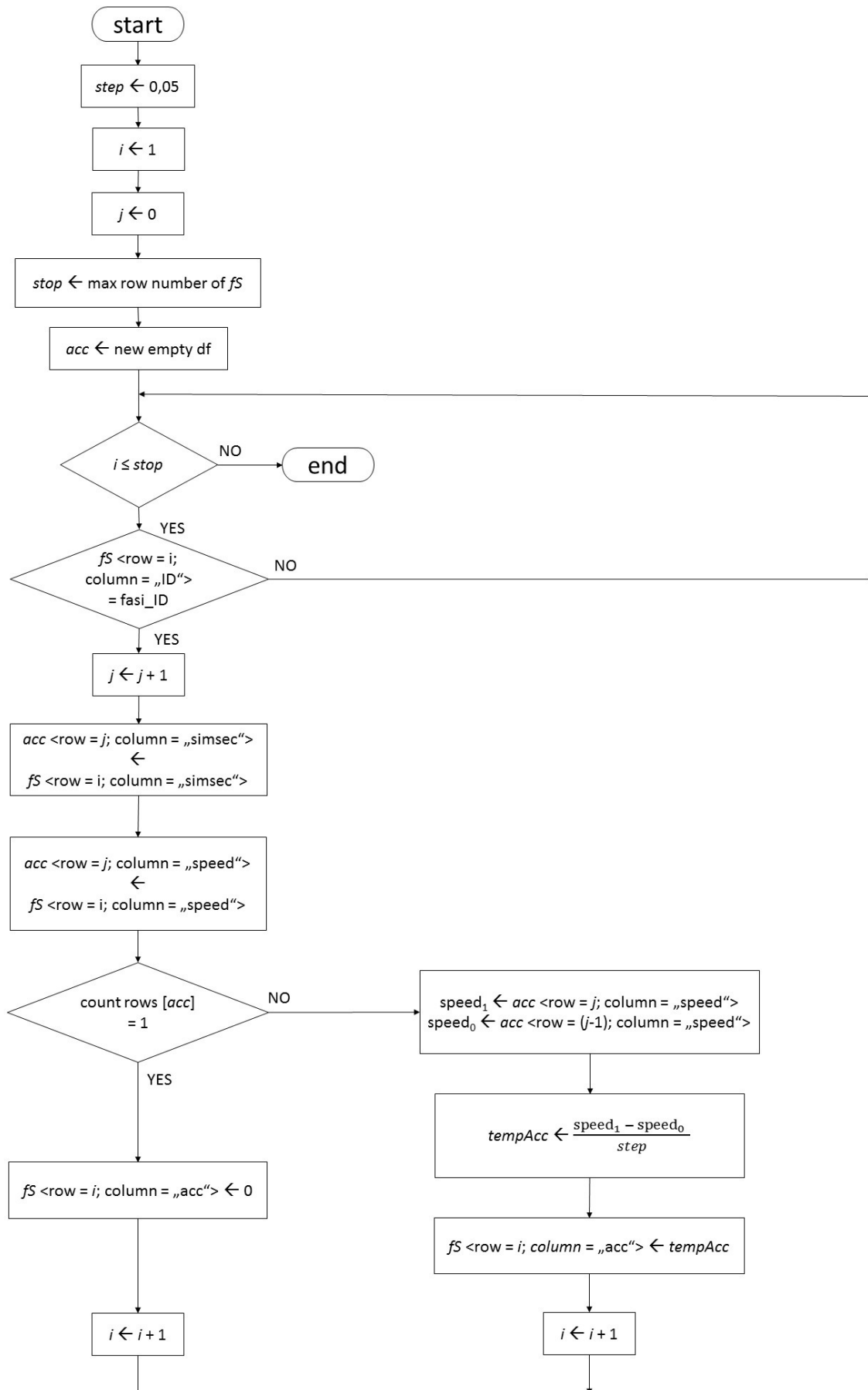


Abbildung 46 Flussdiagramm der Beschleunigungsberechnung des Ego-Fahrzeugs

5.2.3 Diagramms.R – Vorbereitungen für die ersten Auswertungen und die Erstellung erster Übersichtsdiagramme

Das „Diagramms.R“ Skript wurde (so wie das „Surrounding.R“ Skript) über das steuernde Skript „Steuerungsskript.R“ aufgerufen. Aus diesem erhielt es Informationen über den aktuell betrachteten Probanden, das aktuell betrachtete Szenario und Ähnliches. Primär wurden in diesem Skript die Daten aus dem *fS* weiterverarbeitet. Aus diesem Grunde wurde bereits am Anfang geprüft, ob die entsprechende *.csv-Tabelle für den aktuell betrachteten Probanden und das aktuell betrachtete Szenario bereits erstellt worden ist. Im Falle, dass das Surrounding-Skript für das Szenario des aktuell betrachteten Probanden noch nicht ausgeführt wurde, wird das Diagramms-Skript an dieser Stelle unterbrochen und der User wird aufgefordert, zuerst das Surrounding-Skript zu starten. Anschließend wurde überprüft, ob es sich bei dem aktuell betrachteten Probanden um einen virtuellen Probanden oder einen tatsächlichen (natürlichen) Probanden handelt. Bei virtuellen Probanden wurde anschließend überprüft, ob in der Variable *fasi_ID* bereits eine entsprechende Fahrzeug-ID hinterlegt wurde. Sofern (z.B. durch einen Neustart des Skripts) keine Fahrzeug-ID hinterlegt war, wurde der User zu einer Eingabe aufgefordert. Bei natürlichen Probanden wurde stets das Ego-Fahrzeug ausgewertet.

Da das eigene Fahrverhalten ab einer gewissen Distanz nicht mehr durch ein vorausfahrendes Fahrzeug beeinflusst wird, wurde ein „berücksichtigter Bereich“ festgelegt, innerhalb dessen noch von einer Beeinflussung auszugehen ist. Als Grenze wurde ein Abstand von 250 m angenommen. Diese Distanz wurde bereits von Geistefeldt et al. [2015] als Vorausschauweite der VISSIM-Fahrzeuge für Autobahnsimulationen gewählt. Somit wurden nur noch jene Fahrzeuge berücksichtigt, welche sich in einer Distanz von 250 m oder weniger, sowohl vor als auch hinter dem Ego-Fahrzeug, befanden. Diese Daten wurden dem data frame *locSurr* zugewiesen.

Zudem wurden in einem Vektor (*simSecTotal*) die einzelnen Zeitschritte aus dem *fS* gespeichert. Dadurch beinhaltet der Vektor eine Auflistung all jener Zeitschritte, welche zwischen den (unter Unterabschnitt 5.2.2 angeführten) Start- und Endbedingungen lagen. Alle weiteren Auswertungen bezüglich Folgeverhalten und Fahrstreifenwechselverhalten arbeiteten mit dem in diesem Skript vorgegebenen Zeitvektor und den reduzierten Datensätzen.

5.3 Auswertung des Längsverhaltens

Nachdem die Datengrundlagen für die ersten beiden ausführenden Skripte geschaffen wurden, zielen die nachfolgenden beiden Skripte auf eine erste Übersicht bezüglich des Längsverhaltens der Probanden ab. Dabei soll das Folgeverhalten in Unterabschnitt 5.3.1 und die allgemeinen fahrdynamischen Kenngrößen im Unterabschnitt 5.3.2 ausgewertet werden. Anhand dieser Übersichten wird eine erste Abschätzung und Einteilung der Fahrverhalten der Probanden getroffen.

5.3.1 follow.R – Analyse des Folgeverhaltens

Aufbauend auf den reduzierten Daten von *locSurr* wurden die Daten unterteilt in einen data frame mit

- Fahrzeugen, welche sich vor dem Ego-Fahrzeug auf dem gleichen Fahrstreifen (*fasiFront*)
- Fahrzeugen, welche sich hinter dem Ego-Fahrzeug auf dem gleichen Fahrstreifen (*fasiBack*)

befinden.

Die Definition „vor“ oder „hinter“ dem Ego-Fahrzeug wurde über die Position der Fahrzeugmitten entlang der Kilometrierung getroffen. Dadurch bleiben die Daten selbst dann konsistent, wenn es zu einem „Unfall“ kommen sollte (d.h. die Fahrzeuge überschneiden sich in der *.fzp-Datei für eine kurze Zeitdauer).

Die anschließend beschriebenen Schritte wurden sowohl für die Fahrzeuge vor dem Ego-Fahrzeug als auch für die Fahrzeuge hinter dem Ego-Fahrzeug durchgeführt. Vereinfacht wird ab dieser Stelle jedoch nur auf die Fahrzeuge vor dem Ego-Fahrzeug eingegangen.

Zunächst wurde ein *tabFront* data frame erstellt, welcher folgende Informationen erfasste:

Tabelle 5 Inhalte des *tabFront* data frames

Name	Einheit	Beschreibung
<i>ID</i>	[-]	Eindeutige Identifikationsnummer des Fahrzeugs vor dem Ego-Fahrzeug
<i>startSec</i>	[s]	Simulationssekunde, in der die <i>ID</i> erstmals in der Folgefahrt vor dem Ego-Fahrzeug auftaucht
<i>endSec</i>	[s]	Simulationssekunde, in der die <i>ID</i> letztmalig in der Folgefahrt vor dem Ego-Fahrzeug protokolliert wird
<i>tOf</i>	[s]	Zeitspanne, in der das Fahrzeug mit der <i>ID</i> vor dem Ego-Fahrzeug gefahren ist
<i>drivStateEnd</i>	[-]	Fahrzustand des Fahrzeugs mit der <i>ID</i> in der <i>endSec</i>
<i>deltaSpeed</i>	[km/h]	Median der Geschwindigkeitsdifferenzen
<i>distance</i>	[m]	Median der Abstände während der Folgefahrt
<i>min_tOf</i>	[s]	Errechneter Zeitwert, welcher von <i>tOf</i> überschritten werden muss um als Folgefahrt gewertet zu werden

Ein Auszug aus dem R-Skript für die Ermittlung dieser Werte kann dem Anhang in Unterabschnitt 10.5.1 entnommen werden.

Eine wesentliche Filterfunktion für die Auswahl von Folgeverhalten wurde über die Bedingung $min_tOf < tOf$ gestaltet. Dabei war die Berechnung von *min_tOf* das ausschlaggebende Kriterium. Es entstand aus dem Grundgedanken, dass das Ego-Fahrzeug eine gewisse Zeit benötigt, um sich an das Vorderfahrzeug anzunähern, bevor es überhaupt in den „Folgebereich“ (siehe Unterabschnitt 2.2.4) kommt. Für diese Mindestfolgezeit wurde die „Zeit bis zur Kollision“ (ttc) angenommen, welche sich aus der Distanz der beiden Fahrzeuge geteilt durch die Geschwindigkeitsdifferenz, mit welcher sich das Ego-Fahrzeug an das VISSIM-Fahrzeug annähert (siehe auch Abschnitt 2.5), ergibt. Verbrachte das Ego-Fahrzeug mehr Zeit hinter dem VISSIM-Fahrzeug, als diese Zeitspanne der Annäherung betrug, befand sich das Ego-Fahrzeug (bei einer unfallfreien Fahrt) spätestens nach dem Überschreiten dieser Mindestfolgezeit im „Folgebereich“.

Nachdem die Geschwindigkeitsverhältnisse bei der ersten protokollierten Simulationssekunde der Folgefahrt nicht unbedingt auf eine Annäherung des Ego-Fahrzeugs an das VISSIM-Fahrzeug deuten müssen, wurde die Berechnung der *min_tOf* über die Medianwerte der Geschwindigkeitsdifferenzen und der Distanzen vorgenommen (siehe auch Unterabschnitt 10.5.1). Da vor allem bei langen Folgefahrten die Geschwindigkeitsdifferenzen gegen Null tendieren und sich die Folgeabstände auf einem konstanten Wert einpendeln, ergab sich für lange Folgefahrten teilweise ein zu strenger Filter. Nachdem bei der Durchführung der Simulatorstudie allerdings nur selten längere Folgefahrten durch Probanden festgestellt wurden, wurde diese Überfilterung im Rahmen dieser Arbeit in Kauf genommen, um die Anzahl der potentiellen Folgefahrten auf ein überschaubares Maß zu reduzieren.

Als nächster Schritt wurden die Datensätze aus *tabFront* dahingehend untersucht, ob die *tOf* zum einen größer als eine empirisch ermittelte Mindestfolgezeit von 10 Sekunden ist und andererseits, ob die *tOf* größer als die berechnete *min_tOf* ist. Entsprechend der jeweilige Datensatz diesen Kriterien, so wurde diese Folgefahrt in einem data frame namens *intSitFront* aufgenommen. In diesem data frame wurden somit all jene Folgefahrten abgespeichert, welche eine potentielle Folgefahrt mit Eintritt des Ego-Fahrzeugs in den Folgebereich darstellen. Für diese Folgefahrten sollen im anschließenden Schritt die Daten für die Erstellung einer Trajektorie gesammelt werden. Trajektorien sind grafische Darstellungen der Positionen eines Objektes zu definierten aufeinanderfolgenden Zeitpunkten. Im Verkehrswesen werden Trajektorien in einem Weg-Zeit-Diagramm dargestellt und können Informationen von einem oder mehreren Objekten (z.B. Fahrzeugen) beinhalten.

Ausgehend von diesen (in *intSitFront* aufgezeichneten) Folgesituationen wurden jeweils zwischen den *startSec* und den *endSec* die Datensätze der entsprechenden Fahrzeug-ID aus dem *locSurr* data frame entnommen und in einem neuen data frame namens *trajectory* abgespeichert. *Trajectory* beinhaltet somit die Positionsbestimmung entlang der Kilometrierung zu einem jeden Zeitschritt innerhalb der Folgefahrt, aber auch die Differenzdaten (Differenzgeschwindigkeit, Distanzen etc.) zum Ego-Fahrzeug aus dem Surrounding-Skript. Aus diesem *trajectory*-data frames konnten somit Folgediagramme für eine erste Übersicht entsprechend dem (unter Unterabschnitt 2.2.4 gezeigten) Wiedemann-Folgediagramm erstellt werden. Zusätzlich wurden diese Daten für die nachfolgende (im Unterabschnitt 5.5.2 beschriebene) Detailauswertung herangezogen. Aus diesem Grunde wurde aus einem jeden *trajectory*-data frame ebenfalls eine *.csv-Datei erstellt.

Ausgewählte Folgediagramme von Probanden können dem Abschnitt 6.1 bzw. von VISSIM-Fahrzeugen mit automatisiertem Fahrverhalten dem Abschnitt 10.6 entnommen werden. Eine vollständige Übersicht aller generierten Folgeverhalten kann dem digitalen Anhang entnommen werden. Daraus ist ersichtlich, dass für eine vollständig automatisierte Auswahl der interessanten Folgeverhalten eine weitere Anpassung der Filterkriterien (z.B. über die Häufigkeit der Wechsel zwischen Abstandsabbau und Annäherung der beiden Fahrzeuge) nötig ist. Auf die Auswahl der berücksichtigten Folgefahrten für die Detailauswertung wird in Unterabschnitt 5.5.2 eingegangen.

5.3.2 **fahrdyn_Kenngrößen.R – Berechnung d. fahrdynamischen Kenngrößen**

Um neben den einzelnen Detailausschnitten bei den Folgefahrten auch eine generelle Aussage bezüglich des Fahrverhaltens der Probanden treffen zu können, wurden für alle Szenarien der Probanden auch ausgewählte fahrdynamische Kenngrößen ermittelt. Anhand dieser Kenngrößen sollen die Veränderungen im Fahrverhalten durch Interaktionen mit Fahrzeugen unterschiedlicher Automatisierungsstufen und unterschiedlicher Folgeabstände sichtbar gemacht werden. Dabei werden nicht einzelne Interaktionen analysiert, sondern die Veränderung des Fahrverhaltens während der gesamten Fahrt im berücksichtigten Bereich. Dieser Bereich beginnt ab der Position, an welcher das Ego-Fahrzeug erstmalig schneller als 80 km/h fährt und endet unmittelbar nach dem letzten Knotenpunkt. Somit werden die fahrdynamischen Kenngrößen ausschließlich für jenen Streckenabschnitt ausgewertet, in dem die Pkws eine Wunschgeschwindigkeit entsprechend der jeweiligen Verteilungskurven für eine höchstzulässige Geschwindigkeit von 130 km/h bzw. die Lkws eine Wunschgeschwindigkeit entsprechend der jeweiligen Verteilungskurve für eine höchstzulässige Geschwindigkeit von 80 km/h (bzw. 90 km/h bei Szenarien mit automatisiertem Fahrverhalten) aufweisen (siehe Abbildung 9). Zusätzlich konnte somit das von Proband 11 abgebrochene Szenario vollständig mitberücksichtigt werden, da ein „Ruckeln“ der Simulation erst nach dem letzten Knotenpunkt auftrat.

Ausgehend von den „fullSurrounding.csv“ werden die Daten von den jeweils betrachteten Probanden (und den entsprechenden Szenarien) eingelesen. Dabei wird überprüft, ob in einer zusammenfassenden Ausgabedatei namens „fahrdynamischeKenngrößen.csv“ (im Weiteren abgekürzt mit „fK“) bereits ein Eintrag für das aktuelle Szenario des jeweiligen Probanden besteht. Im Falle, dass dieses bereits berechnet wurde, kann der User entscheiden, ob die jeweiligen Werte neu berechnet werden sollen oder ob die bestehenden Werte beibehalten werden sollen.

Sollten noch keine Kenngrößen für das jeweilige Szenario des aktuellen Probanden berechnet worden sein oder gibt der User an, dass diese erneut berechnet werden sollen, wird dieses Skript weiter ausgeführt und die unter Abschnitt 2.4 beschriebenen Kenngrößen ermittelt.

Eine grafische Aufbereitung der im fK gespeicherten Kennwerte wird im Skript „Boxplot.R“ (siehe Unterabschnitt 5.5.1) vorgenommen.

5.4 Auswertung des Querverhaltens

Wie bei der Auswertung des Längsverhaltens bauen die Skripte zur Auswertung des Querverhaltens auf den „fullSurrounding.csv“ auf. Dabei werden zunächst Diagramme der Umgebungssituation im Zeitbereich der FS-Wechsel des Ego-Fahrzeug erstellt.

5.4.1 LC.R – Vorbereitung der detaillierten Auswertung und Erstellung erster Umgebungsgrafiken bei den Fahrstreifenwechseln des Ego-Fahrzeugs

Das Skript „LC.R“ wurde (wie auch das „follow.R“ Skript) im Rahmen von „Diagrams.R“ gestartet. Dabei wurden alle Berechnungen und data frames von „Diagrams.R“ übernommen und standen somit für eine Auswertung des Fahrstreifenwechselverhaltens zur Verfügung. Dadurch wurden alle nachfolgenden Daten nur zwischen den – im Surrounding.R-Skript – definierten Grenzen ausgewertet (Start ab dem Zeitpunkt der ersten Überschreitung von 80 km/h und Ende mit dem Verlassen der Simulationsstrecke durch das Ego-Fahrzeug bzw. nach Abbruch durch den Probanden).

Als erster Schritt wurde im „LC.R“ Skript ein data frame (namens *temp_LC_ego*) erstellt, welche alle FS-Wechsel des Ego-Fahrzeugs beinhaltet, die in dem betrachteten Zeitraum lagen. Für die Generierung von *temp_LC_ego* wurde in jedem Zeitschritt innerhalb des Betrachtungszeitraums überprüft, ob sich das Ego-Fahrzeug im jeweils vorangegangenen Zeitschritt auf einem anderen Fahrstreifen befand als im aktuell betrachteten Zeitschritt. Daraus erhält man jedoch lediglich die Information, ob und wann sich das Ego-Fahrzeug mit dem Fahrzeugmittelpunkt über dem einen oder anderen Fahrstreifen befindet.

Da dieser Umsprung des aktuell benutzten Fahrstreifens mitten im FS-Wechsel-Prozess stattfand, ist es erforderlich, die Zeitspanne zwischen dem ersten Aufkommen eines FS-Wechselwunsches und dem protokollierten FS-Wechsel zu kennen. Diese „Vorlaufzeiten“ wurden in der *.fzp-Datei für die VISSIM-Fahrzeuge mitprotokolliert. Eine Bestimmung des Zeitpunkts, zu dem die Probanden einen Fahrstreifenwechselwunsch erstmalig (vor einem entsprechenden Wechsel) hatten, war in der *.fzp-Datei allerdings nicht möglich. Um dennoch eine Abschätzung dieser Zeitspanne vornehmen zu können, wurde je Proband einmalig das Skript „timeframe.R“ ausgeführt. In „timeframe.R“ wurde eine *.csv-Datei generiert, welche die Zeitspannen zwischen dem erstmaligen Aufkommen eines FS-Wechselwunsches und dem protokollierten FS-Wechsel der VISSIM-Fahrzeuge (mit einem menschenähnlichen Fahrverhalten) enthielt. Diese Ermittlung wird im Unterabschnitt 5.4.2 genauer beschrieben. Um eventuelle Ausreißer mit sehr langen Vorlaufzeiten in den Daten der VISSIM-Fahrzeuge zu eliminieren, wurde in „LC.R“ nach dem Einlesen der entsprechenden *.csv-Datei

der 90%-Quantilwert der Vorlaufzeit ermittelt. Da der Fahrstreifenwechsel der Probanden nicht mit dem protokollierten Umsprung der FS-Nummer im *.fzp abgeschlossen war, sondern eine gewisse Zeitspanne bis zum Abschluss benötigte, wurden auch diese Zeiten im „timeframe.R“ Skript mit ausgewertet. Bei der Nachlaufzeit wurde ebenfalls die 90%-Quantile angesetzt, um mögliche Ausreißer mit verlängerten Wechseldauern auszuschließen.

Diese Zeitspannen vor bzw. nach dem protokollierten FS-Wechsel wurden von dem Zeitpunkt des unter *temp_LC_ego* gelisteten Wechsels abgezogen bzw. dazuaddiert, um eine genäherte Zeitspanne für die Fahrstreifenwechsel zu erhalten. Die FS-Wechsel wurden in weiterer Folge ausschließlich in diesen Zeitspannen weiter analysiert. Sofern das Ende eines FS-Wechsels sich mit dem Beginn eines nachfolgenden FS-Wechsels überschneidet, wurden diese beiden FS-Wechsel zu einem FS-Wechsel-Manöver zusammengefasst.

In dem *dynLC* – data frame wurden schließlich von allen Fahrzeugen, welche sich in den Zeitspannen der FS-Wechsel-Manöver in der Umgebung des Ego-Fahrzeugs befanden (aus dem *locSurr* – data frame), folgende Werte aufgenommen:

	counterLC	simsec	ID	line	speed	middlePos	distance	deltaspeed	color	cex	pch	disMidPos	fd	ttc
1	1	99.75	80	3	143.93	971.285	53.83	-41.14	green	0.8	20	58.240	1.8852807	1.000000e+04
2	1	99.75	78	2	138.49	1017.535	100.08	-35.70	blue	0.8	20	104.490	3.5050880	1.000000e+04
3	1	99.75	32	1	83.47	941.730	21.47	19.32	orange	0.8	20	28.685	0.7519409	4.000621e+00
4	1	99.75	1	2	102.79	913.045	0.00	0.00	blue	0.8	20	0.000	0.0000000	0.000000e+00
5	1	99.75	81	3	141.14	898.575	10.26	-38.35	green	0.8	20	-14.470	-0.2616976	9.631291e-01
6	1	99.75	46	2	68.86	824.235	84.40	33.93	blue	0.8	20	-88.810	-4.4124310	1.000000e+04

Abbildung 47 Auszug der ersten sechs Datensätze des data frames "dynLC" bei Proband 1 - SAE0

Dabei beschreibt

<i>counterLC</i>	um welches Fahrstreifenwechselmanöver es sich handelt
<i>simsec</i>	die Simulationssekunde, in der diese Daten aufgezeichnet wurden
<i>ID</i>	auf welches Fahrzeug sich die Daten beziehen
<i>line</i>	auf welchem Fahrstreifen sich das jeweilige Fahrzeug befand
<i>speed</i>	die momentane Geschwindigkeit des jeweiligen Fahrzeugs
<i>middlePos</i>	die absolute Position entlang der Kilometrierung
<i>distance</i>	die Distanz [m] zwischen dem Ego-Fahrzeug und dem jeweiligen VISSIM-Fahrzeug
<i>delatSpeed</i>	die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen dem Ego-Fahrzeug und dem VISSIM-Fahrzeug
<i>color</i>	die Farbe des Fahrzeugs in der Visualisierung des Fahrstreifenwechselmanövers
<i>cex & pch</i>	Eigenschaften der Darstellung in der Visualisierung des Fahrstreifenwechselmanövers
<i>disMidPos</i>	die Distanz zwischen den Mittelpunkten des Ego-Fahrzeugs und des VISSIM-Fahrzeugs
<i>fd</i>	der Folgeabstand zwischen dem Ego-Fahrzeug und dem jeweiligen VISSIM-Fahrzeug
<i>ttc</i>	die momentane Zeit bis zur Kollision (bei zunehmender Distanz gilt: $ttc = 10.000$ [s])

Mit diesen Daten wurden anschließend die Fahrstreifenwechseldiagramme erstellt. Sie zeigen die gesamte nähere Umgebung des Ego-Fahrzeugs zum Zeitpunkt des Fahrstreifenwechsels. Diese Grafiken halfen bei einer qualitativen Analyse der Umgebungssituation des Ego-Fahrzeugs. Über die zeitliche Änderung der Folgeabstände (zu den VISSIM-Fahrzeugen) vor und hinter dem Ego-Fahrzeug konnte eine Übersicht der Umgebungssituation zum Zeitpunkt der FS-Wechsel-Manöver geschaffen werden (siehe Abbildung 48).

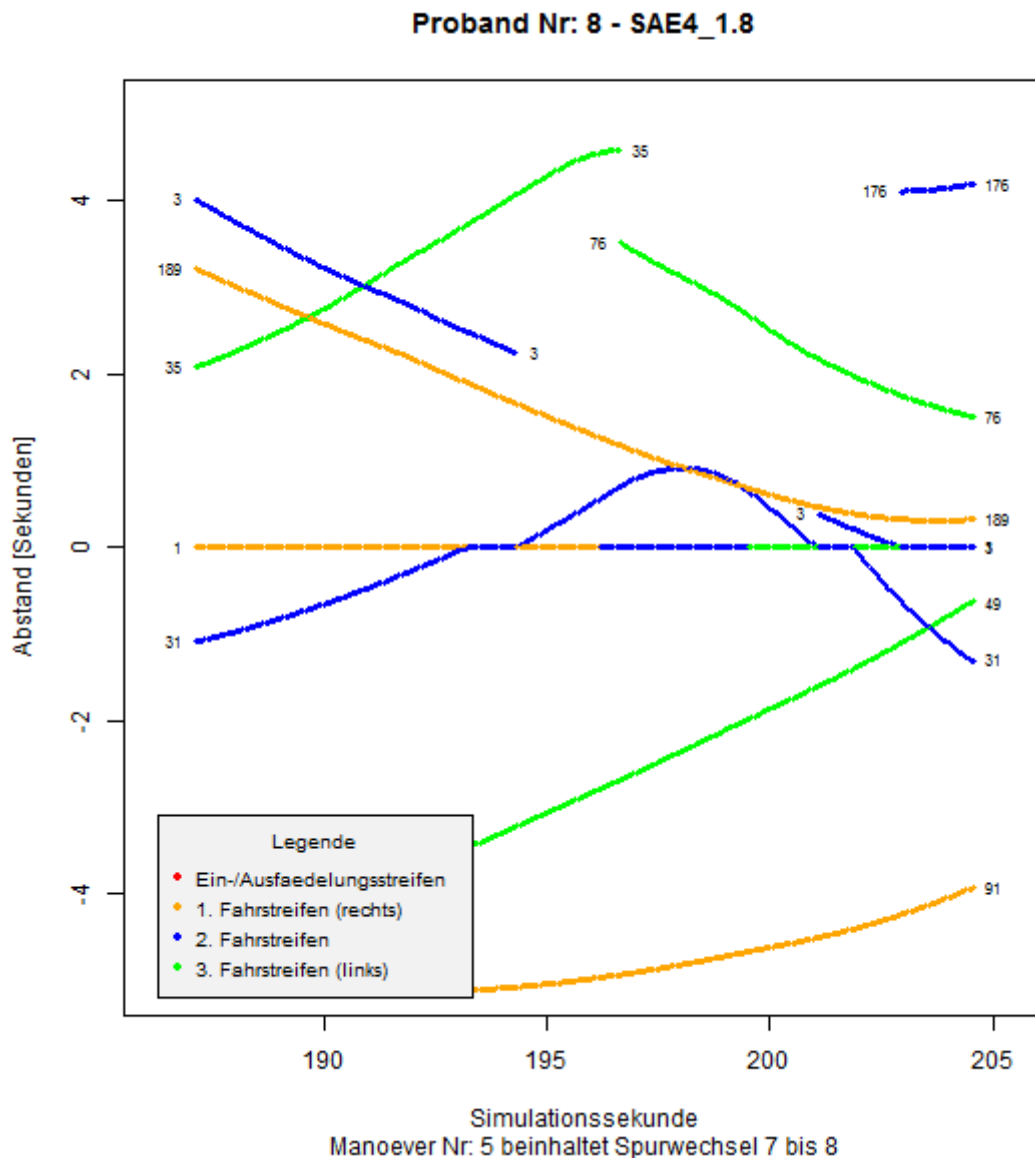


Abbildung 48 FS-Wechsel-Manöver 5 von Proband 8 (SAE4_1.8) beinhaltet FS-Wechsel 7 und 8

Das Ego-Fahrzeug (mit der Fahrzeug-ID 1) hat stets den Abstand 0 [m] zu sich selbst und wird daher in Abbildung 48 über die gesamte Zeitspanne entlang der 0-Meter-Abstandslinie aufgetragen. Der aktuell benutzte Fahrstreifen wurde über eine farbliche Zuordnung (siehe Legende Abbildung 48) dargestellt. Die Punkte des Ego-Fahrzeugs werden allerdings von den Punkten der VISSIM-Fahrzeuge überdeckt. Sofern sich nun ein VISSIM-Fahrzeug auf selber Höhe mit dem Ego-Fahrzeug befindet, wird der Fahrstreifen des VISSIM-Fahrzeugs angezeigt und jener des Ego-Fahrzeugs überdeckt. Somit ist darauf zu achten, ob vor einem Farbwechsel der Abstand zu einem VISSIM-Fahrzeug gleich Null geworden ist.

Zu Simulationssekunde 187 befand sich das Ego-Fahrzeug hier auf dem rechten FS und hatte einen Folgeabstand von mehr als 3 Sekunden zu Fzg 189, welches ebenfalls auf dem rechten FS (vor dem Ego-Fahrzeug) fuhr. Im weiteren Verlauf näherte sich das Ego-Fahrzeug an Fzg 189 an. Dabei wurde es von Fzg 31 auf dem zweiten FS in etwa zur Simulationssekunde 197 überholt. Unmittelbar nachdem das Ego-Fahrzeug von Fzg 31 überholt wurde, wechselte es ebenfalls auf den mittleren FS. Da sich auf diesem FS das Fzg 3 mit annähernd der gleichen Geschwindigkeit bewegte wie Fzg 189 (auf dem rechten FS), nahm der Abstand ebenfalls kontinuierlich ab (soweit sichtbar). Fzg 31

wechselte in diesem Fall nicht den FS, sondern blieb hinter Fzg 3 auf dem mittleren FS. Dadurch verschwand Fzg 3 vorübergehend aus dem Diagramm, da es inzwischen nicht mehr das nächste Fahrzeug, sondern bereits das übernächste Fahrzeug war. Da sich zu dieser Zeit das Ego-Fahrzeug an beide VISSIM-Fahrzeuge (3 & 31) angenähert hatte, führte das Ego-Fahrzeug innerhalb weniger Sekunden einen zweiten FS-Wechsel auf den linken FS durch. Seit der Simulationssekunde 198 war auf dem dritten FS ein Fzg (ID = 49) sichtbar, welches in den nachfolgenden Simulationssekunden kontinuierlich Abstand zum Ego-Fahrzeug abbaute. Zum Zeitpunkt des zweiten FS-Wechsels, innerhalb des in Abbildung 48 gezeigten FS-Wechsel-Manövers, hatte Fzg 49 allerdings noch einen Folgeabstand von ca. 2 Sekunden. In den nachfolgenden Simulationssekunden überholte das Ego-Fahrzeug am linken FS die beiden VISSIM-Fahrzeuge auf dem mittleren FS. Ebenfalls hatte Fzg 189 auf dem rechten FS Fzg 3 eingeholt. Fzg 189 wurde vom Ego-Fahrzeug innerhalb des dargestellten Zeitausschnittes allerdings nicht eingeholt/überholt.

Alle Grafiken der FS-Wechsel-Manöver (aller Probanden und aller Szenarien) können dem digitalen Anhang entnommen werden.

Da diese Art der Analyse zwar eine gute Übersicht über die Verkehrssituation bietet, allerdings nicht zeiteffizient war und auch keine genauen, vergleichbaren Werte hervor brachte, wurde entschieden, dass eine automatisierte Auswertung der Fahrstreifenwechsel erfolgt. Hierfür wurden die akzeptierten Zeitlücken zu den hinteren Fahrzeugen des Zielfahrstreifens ausgefiltert und verglichen. An dieser Stelle trat jedoch abermals das Problem auf, dass der protokollierte Zeitpunkt des FS-Wechsels nicht den Zeitpunkt darstellte, an dem der Proband die Entscheidung zum FS-Wechsel getroffen hatte. Um alle FS-Wechsel der Probanden möglichst objektiv analysieren zu können, wurde zunächst eine Abschätzung der Dauer zwischen dem Entschluss zum FS-Wechsel (nicht zu verwechseln mit dem Aufkommen eines Wunsches zum FS-Wechsel!) und dem protokollierten FS-Wechsel in der *.fzp-Datei nötig. Dieser wurde ebenfalls wie auch das Aufkommen des Wunsches eines FS-Wechsels über den Fahrstatus der VISSIM-Fahrzeuge angenähert. Hierfür wurde das Skript „LC_Evaluation.R“ (siehe Unterabschnitt 5.4.3) gestartet.

5.4.2 timeframe.R – Analyse der Zeitspannen zwischen dem Aufkommen eines FS-Wechsel-Wunsches, dem protokollierten FS-Wechsel und dem Abschluss des FS-Wechsels

Bei der Analyse des Fahrstreifenwechsels in den protokollierten *.fzp-Dateien zeigt sich das Problem, dass vom Ego-Fahrzeug (welches durch die Probanden gesteuert wurde) kein Fahrstatus („Wants to change lane“ o.Ä.) aufgezeichnet werden kann. Somit führte das Ego-Fahrzeug die Fahrstreifenwechsel scheinbar innerhalb eines Zeitschrittes (bei 20 Hz innerhalb von 0,05 Sekunden) durch. Bei den VISSIM-Fahrzeugen wurde hingegen nach einem jeden Simulationsschritt ein Fahrstatus berechnet und protokolliert.

Aus diesem Grund wurde im Szenario SAE0 das Fahrverhalten der VISSIM-Fahrzeuge beim Fahrstreifenwechsel in der Zeitspanne zwischen dem ersten Aufkommen eines FS-Wechselwunsches und dem protokollierten FS-Wechsel untersucht. Diese erste Selektion erfolgte bereits vor dem Start des Skripts, indem bei der Ausführung des „LC.R“ Skripts geprüft wurde, ob aktuell das Szenario SAE0 des jeweiligen Probanden analysiert wird bzw. ob für den jeweiligen Probanden das „timeframe.R“ Skript bereits einmal ausgeführt wurde.

Sofern das „timeframe.R“ Skript gestartet wurde, wurde zunächst gleich wie bei dem „Surrounding.R“ Skript die gesamte *.fzp-Datei erneut eingelesen, da die Fahrstreifenwechsel aller VISSIM-Fahrzeuge in dem aufgezeichneten Szenario ausgewertet werden sollten und nicht nur jene der Fahrzeuge, welche sich am nächsten zum Ego-Fahrzeug bewegten.

Für die Auswahl der Fahrstreifenwechsel, welche zur Zeitbestimmung herangezogen wurden, wurde ein Stufensystem eingeführt. Dabei wurde der Fahrstatus der VISSIM-Fahrzeuge Schritt für Schritt in jeder Simulationssekunde analysiert und einer Stufe (Tabelle) zugeordnet. Eine Einhaltung der stufenweisen Zuordnung der Datensätze zu einer Tabelle wurde dabei zwingend vorgegeben.

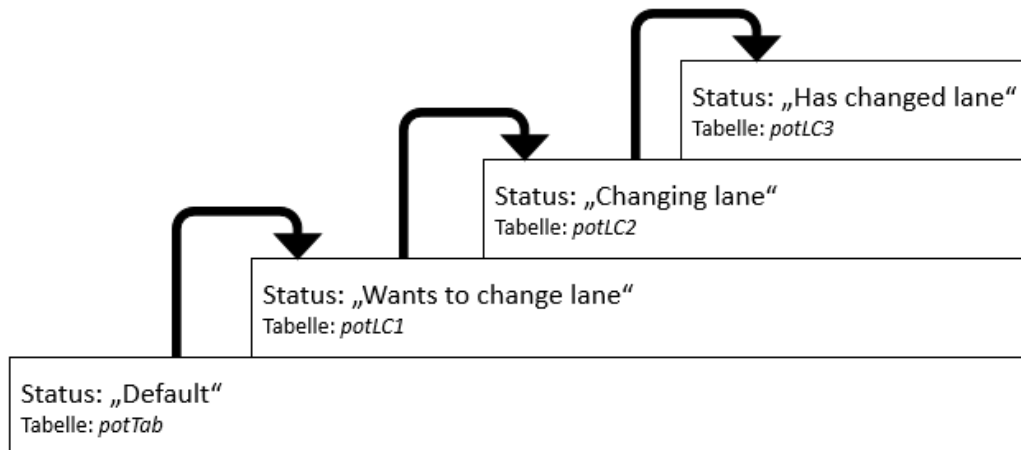


Abbildung 49 Stufen der Auswertung im „timeframe.R“ Skript

Umgesetzt wurde dieses System mit vier Tabellen:

- Die erste Tabelle (*potTab*) erfasste alle Datensätze aller VISSIM-Fahrzeuge, welche den Fahrstatus „Default“ aufwiesen. Dadurch konnte gewährleistet werden, dass stets die gesamte Zeitspanne zwischen dem Aufkommen eines FS-Wechsel-Wunsches und der Durchführung (bis zum Abschluss des FS-Wechsels) ausgewertet wurde.
- Erst wenn der aktuell betrachtete Fahrzeugstatus des jeweiligen Fahrzeugs in *potTab* auf „Wants to change lane“ sprang, startete die eigentliche Untersuchung im „timeframe.R“ Skript. In *potLC1* wurden die aktuelle Simulationssekunde und die Fahrzeug-ID des Fahrzeugs aufgenommen, welches in der aktuellen Simulationssekunde erstmals den Status „Wants to change lane“ aufwies. Sofern ein Fahrzeug in diese Tabelle aufgenommen wurde, wurde es umgehend aus der *potTab* entfernt.
- Die nächste Stufe (Aufnahme in der Tabelle *potLC2*) wurde erreicht, wenn eine Änderung des aktuell befahrenen Fahrstreifens (verglichen mit dem Zeitschritt zuvor) protokolliert wurde und sich zusätzlich bereits zuvor der Fahrstatus des jeweiligen VISSIM-Fahrzeugs auf „Changing lane“ geändert hatte. Dabei wurden neben der Fahrzeug-ID und der Startsekunde aus *potLC1* noch zusätzlich die Simulationssekunde des FS-Wechsels (*LCSec*) festgehalten. Wie im vorangegangenen Punkt beschrieben, wurde mit der Aufnahme eines Fahrzeugs in *potLC2* dessen Eintrag in *potLC1* entfernt.
- Für einen erfolgreichen Abschluss musste allerdings noch die Tabelle *potLC3* erreicht werden. Dabei war es erforderlich, dass der Fahrstatus nach dem erfolgreichen FS-Wechsel nicht mehr „Changing lane“ oder „Has changed lane“ lautete. Der Zeitschritt, in dem erstmals ein anderer Fahrstatus nach dem FS-Wechsel erschien, wurde als Abschluss des FS-Wechsel-Manövers angesehen und als zusätzliche Information zu den in *potLC2* vorhandenen Einträgen ergänzt. Ebenfalls wurde der Eintrag des entsprechenden Fahrzeugs aus *potLC2* mit der Aufnahme in *potLC3* entfernt.

Sofern diese Abfolge an Änderungen des Fahrstatus von einem Fahrzeug an irgendeinem Punkt nicht eingehalten wurde, wurde es aus den Tabellen entfernt und musste für eine erneute Auswertung zuerst wieder in der Tabelle *potTab* (durch Aufweisen des Fahrstatus „Default“) aufgenommen werden. Ein Auszug aus dem Skript-Code kann dem Anhang (siehe Unterabschnitt 10.5.2) entommen werden.

All jene Fahrstreifenwechsel, welche es bis zur Tabelle *potLC3* geschafft hatten, wurden anschließend für die Analyse der Zeitspannen zwischen dem Aufkommen eines FS-Wechselwunsches und dem protokollierten FS-Wechsel in der *.fzp-Datei sowie der nachfolgenden Dauer bis zum Abschluss des FS-Wechsels herangezogen. Diese Zeitspannen der FS-Wechsel wurden in einer *.csv-Tabelle je Proband abgespeichert. Im Rahmen des „LC.R“ Skripts wurden von diesen Zeitspannen die 90%-Quantilen als Vorlaufzeit für einen FS-Wechsel bestimmt.

5.4.3 LC_Evaluation.R – Analyse der Zeitspanne zwischen dem Entschluss zum FS-Wechsel und dem protokollierten FS-Wechsel, sowie der Abstände zu den VISSIM-Fahrzeugen im Zeitpunkt des Entschlusses

Für die (im Unterabschnitt 5.4.1 beschriebene) automatisierte Auswertung der FS-Wechselverhalten wurden zunächst die drei Fahrstreifenwechselsituationen unterschieden:

1. Das Ego-Fahrzeug wechselt auf einen Fahrstreifen, auf dem sich ein Fahrzeug mit höherer Geschwindigkeit (als jene des Ego-Fahrzeugs) von hinten annähert. Diese Situation tritt üblicherweise dann auf, wenn das Ego-Fahrzeug auf einen schnelleren Fahrstreifen (nach links) wechselt und sich dabei ein Fahrzeug auf dem Zielfahrstreifen von hinten an das Ego-Fahrzeug annähert.
2. Das Ego-Fahrzeug wechselt auf einen Fahrstreifen, auf dem sich zumindest ein Fahrzeug hinter dem Ego-Fahrzeug befindet. Dabei soll das Ego-Fahrzeug eine höhere Geschwindigkeit als das hinterherfahrende Fahrzeug besitzen. Dieser Fall tritt üblicherweise bei einem Fahrstreifenwechsel nach rechts auf.
3. Ein anderes Fahrzeug mit einer niedrigeren Geschwindigkeit wechselt vor das Ego-Fahrzeug auf dessen Fahrstreifen. Diese Situation ist in der Realität zu beobachten, wenn beispielsweise das wechselnde Fahrzeug auf dem ursprünglichen (rechten) Fahrstreifen ein noch langsames Fahrzeug überholen möchte. Für diese Analysen wurden die Angaben der Probanden während der Simulation manuell ausgewertet und die entsprechenden Situationen in den *.fzp-Dateien identifiziert.

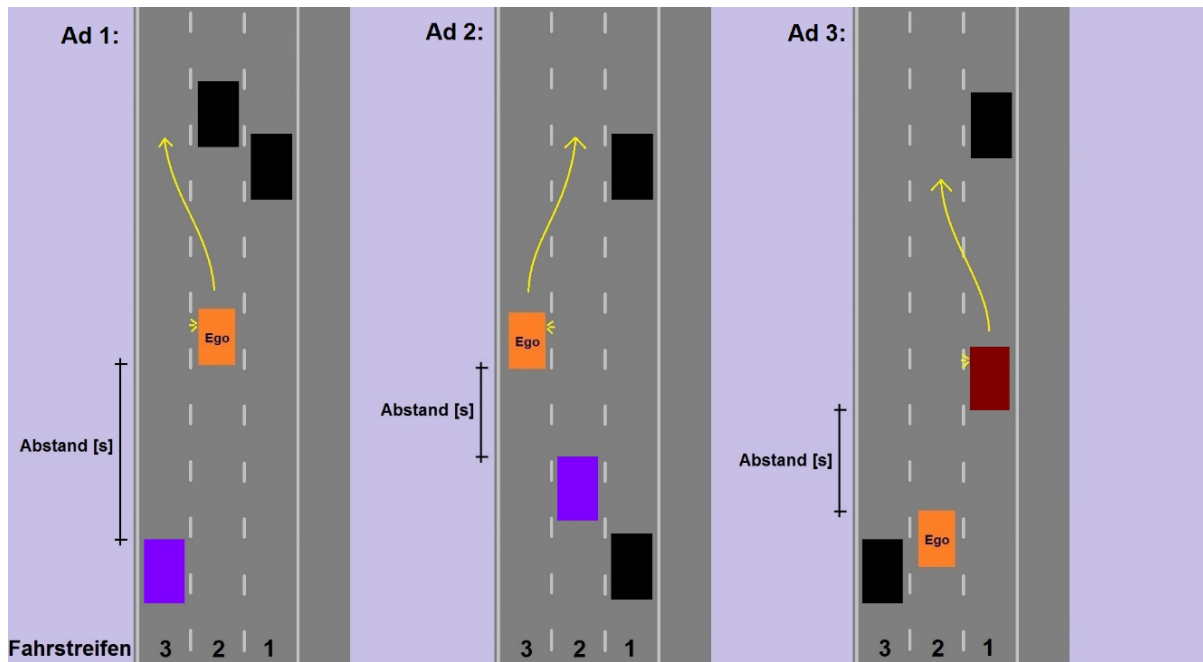


Abbildung 50 Schematische Übersicht der berücksichtigten Fahrstreifenwechsel-Manöver

Da für die ersten beiden Punkte jene Abstände zum Hinterfahrzeug im Zeitpunkt des Entschlusses zu einem FS-Wechsel interessant sind, aber diese Zeitpunkte vom Ego-Fahrzeug in den *.fzp-Dateien nicht aufgezeichnet werden konnten, war zunächst eine Schätzung dieser Zeitpunkte nötig. Als Datengrundlage wurde das Fahrzeugprotokoll (*.fzp-Datei) der VISSIM-Fahrzeuge von Proband 1 im Szenario SAE0 herangezogen. Aus diesem Protokoll wurden, unter Einhaltung der in Unterabschnitt 5.2.2 definierten Startbedingung, alle FS-Wechsel der VISSIM-Fahrzeuge, welche über den *drivState* „Changing lane“ eingeleitet wurden, auf deren Dauer bis zum Wechsel des Fahrstreifens untersucht. Die Zeitspannen (zwischen dem ersten protokollierten *drivState* „Changing lane“ eines VISSIM-Fahrzeugs und dessen Änderung des benutzten Fahrstreifens) wurden in einen data frame aufgenommen und anschließend unter der Bezeichnung „LCtime.csv“ abgespeichert (siehe Anhang, Unterabschnitt 10.5.5). Anschließend wurde, unter der Bezeichnung *t4LC*, der Median dieser Zeitspannen herangezogen, um eine Analyse der Fahrsituation zum angenäherten Zeitpunkt der Entscheidung zu einem FS-Wechsel durchführen zu können. Für *t4LC* ergab sich, aus insgesamt 3321 verschiedenen Fahrstreifenwechseln, ein Wert von 1,45 Sekunden. Somit wurden bei allen FS-Wechseln, welche vom Ego-Fahrzeug ausgeführt wurden, genau 1,45 Sekunden vor dem protokollierten FS-Wechsel die Abstände (ttc und Folgeabstand) zu den nachfolgenden VISSIM-Fahrzeugen (auf dem Zielfahrstreifen) ermittelt. Die Ergebnisse aller Probanden und Szenarien wurden in einer Datei („DistLC.csv“) gesammelt und abgespeichert. Zu erwähnen bleibt, dass zusätzlich zu den unter Punkt 1 und Punkt 2 beschriebenen Szenarien noch weitere FS-Wechsel auftraten, in welchen sich kein VISSIM-Fahrzeug innerhalb des berücksichtigten Bereiches (siehe Unterabschnitt 5.2.3) befand. Diese Fahrstreifenwechsel wurden der Vollständigkeit halber ebenfalls untersucht. Da sich allerdings für den Folgeabstand und die Zeit bis zur Kollision in diesen Fällen keine Werte berechnen ließen, sind diese Fahrstreifenwechsel bei der Erstellung der im Unterabschnitt 5.5.3 erwähnten Boxplots nicht enthalten.

Im zweiten Teil dieses Skripts wurden die von den Probanden im Fragebogen erwähnten Situationen mit einem „unangenehmen Fahrstreifenwechsel der VISSIM-Fahrzeuge vor das Ego-Fahrzeug“ behandelt. Hierfür wurden zunächst die im Fragebogen notierten zusätzlichen Anmerkungen im aufgezeichneten Video-Material identifiziert. Dieser Schritt war nötig, da sich einige Anmerkungen

auf Fahrstreifenwechselmanöver bezogen, bei welchen die wechselnden VISSIM-Fahrzeuge einen anderen FS als den vom Ego-Fahrzeug benutzten FS als Zielfahrstreifen hatten. Fahrsituationen, bei denen die Probanden von einem FS-Wechsel der VISSIM-Fahrzeuge überrascht wurden, allerdings zur gleichen Zeit selber einen FS-Wechsel durchführten, wurden in diese Auswertungen nicht aufgenommen. Von all jenen Situationen, in welchen sich im Video-Material eine diesen Bedingungen entsprechende Situation ergab, wurde jeweils ein Zeitpunkt (eine diskrete Simulationssekunde) in den entsprechenden *fullSurrounding* data frames lokalisiert und manuell in eine *.csv-Datei eingetragen. Mit den in dieser *.csv-Datei eingetragenen Daten wurden anschließend, ähnlich dem ersten Teil dieses Skripts, die Folgezeiten und die Zeiten bis zur Kollision ermittelt (siehe Anhang – Unterabschnitt 10.5.5). Bei den FS-Wechsel durch VISSIM-Fahrzeuge konnten die Simulationssekunden, in denen die FS-Wechsel eingeleitet wurden, über die *drivState* mit einer sehr viel höheren Genauigkeit bestimmt werden. Somit wurden die Abstände in der ersten Simulationssekunde nach dem Einleiten des FS-Wechsels erhoben und nicht wie zuvor bei einer Standardvorlaufzeit von 1,45 Sekunden vor dem protokollierten FS-Wechsel.

Nach Abschluss der Auswertungen des Querverhaltens aller Probanden konnten die ergänzenden Operationen und Grafikerstellungen durchgeführt werden.

5.5 Ergänzende Operationen und Grafikerstellungen

Die nachfolgend beschriebenen Skripte wurden bewusst aus dem steuernden Skript „Steuerungsskript.R“ ausgegliedert, da diese Skripte keine standardisierten Auswertungen durchführen bzw. eine vollständige Auswertung aller Probanden voraussetzen. Es war somit eine manuelle Ausführung dieser Skripte nach dem Abschluss der vollständigen Berechnungen erforderlich, welche durch das „Steuerungsskript.R“ über alle Probanden und Szenarien ausgeführt wurden. Die unter diesen Skripts erstellten Grafiken und Ergebnisse werden im Kapitel 6 (Ergebnisse) beschrieben.

5.5.1 Boxplots.R – Grafische Darstellung der fahrdynamischen Kenngrößen

Wie in Unterabschnitt 5.3.2 beschrieben wurden mit diesem Skript die grafischen Darstellungen der fahrdynamischen Kenngrößen erstellt. Für die Auswertungen der fahrdynamischen Kenngrößen wurden Boxplots über die Ergebnisse aller Probanden – aufgeschlüsselt nach den drei Szenarien (SAE0, SAE4_0.9 und SAE4_1.8) – erstellt (siehe auch Abschnitt 6.1). Da für die Ausführung dieses Skripts die fahrdynamischen Kenngrößen aller Probanden vollständig vorhanden sein mussten, wurde die Erstellung dieser Grafiken aus dem Workflow, welcher vom „Steuerungsskript.R“ gesteuert wurde, ausgegliedert. Dies erforderte als ergänzende Operation einen manuellen Start des Skriptes. Ein beispielhafter Auszug für die Erstellung der Boxplots der fahrdynamischen Kenngrößen kann dem Anhang (siehe Unterabschnitt 10.5.3) entnommen werden.

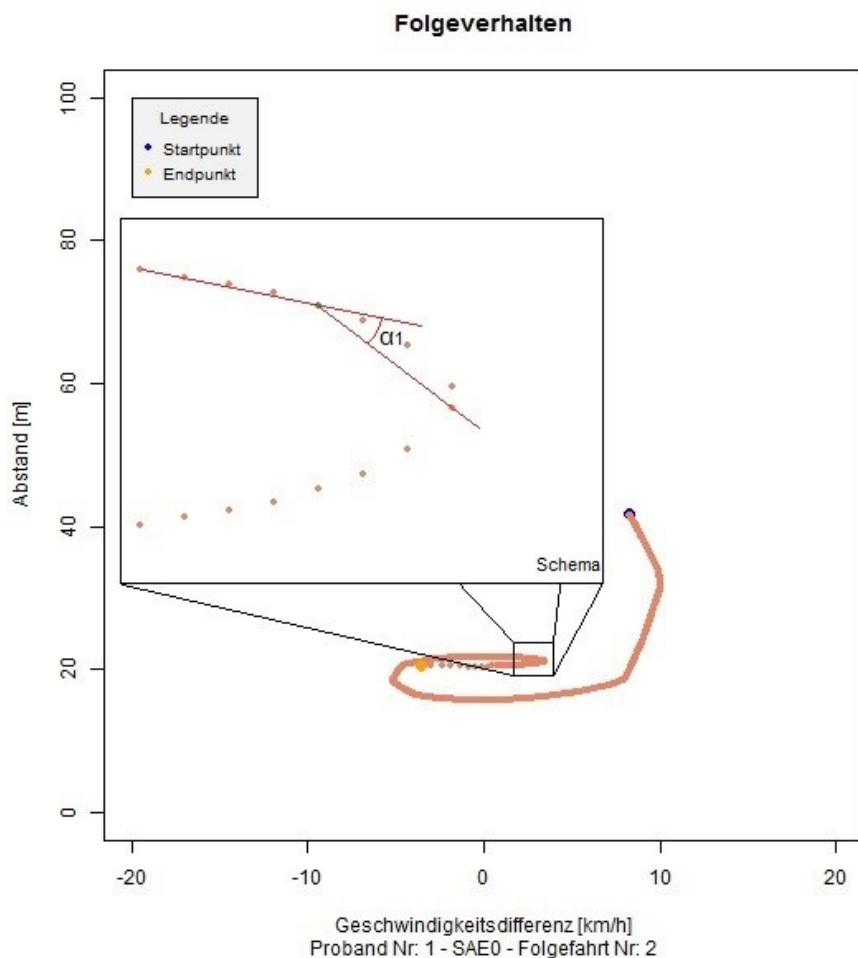
5.5.2 follow_Plots.R – Auswertung und grafische Darstellung der Folgeverhalten

In diesem Skript wurden Detailanalysen der aufgezeichneten Folgeverhalten vorgenommen, welche Aufschlüsse über das Folgeverhalten der Probanden in der jeweiligen Situation liefern sollten. Als Datengrundlage wurden die *trajectory*-Daten, welche im Zuge des „follow.R“ Skripts erstellt wurden, erneut eingelesen. Der Grundgedanke bei dieser Auswertung war, dass die Daten der Differenzgeschwindigkeit und der Distanzen (zwischen dem Ego-Fahrzeug und dem vorausfahrenden VISSIM-Fahrzeug) in einer jeden Simulationssekunde auf deren Änderung relativ zu ihren vorangegangenen bzw. nachfolgenden Simulationssekunden untersucht werden sollten (siehe

Abbildung 51). Hierfür wurden die Differenzgeschwindigkeiten in einer jeden Simulationssekunde auf der Abszisse und die Distanzen auf der Ordinate aufgetragen.

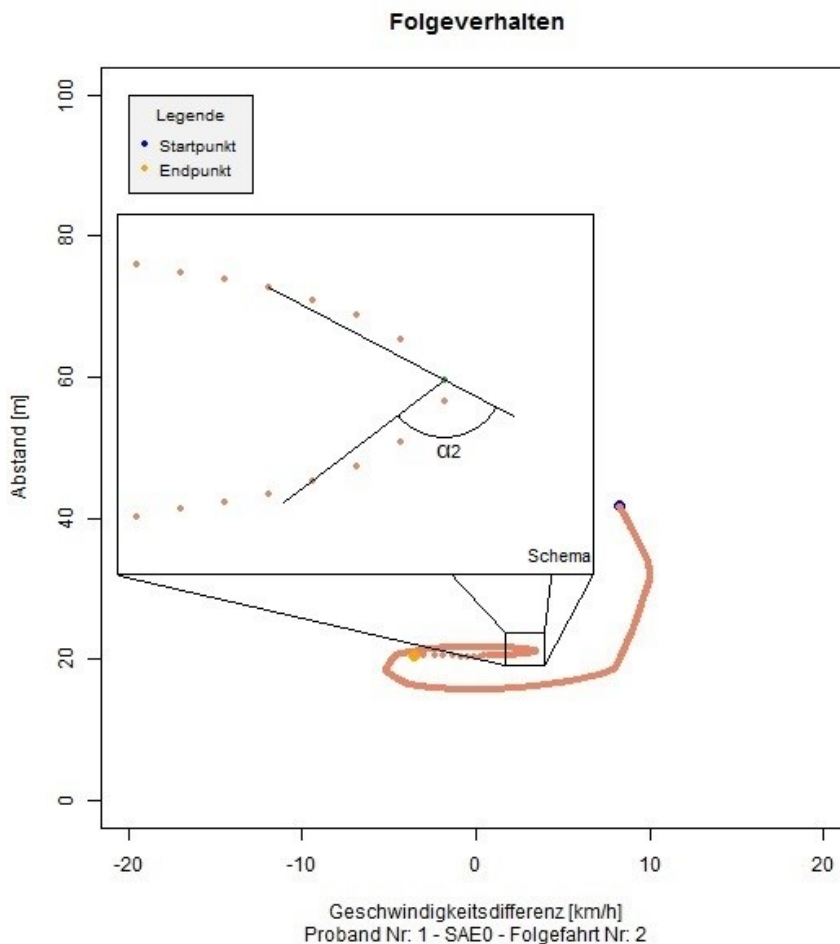
Entsprechend dem Folgeverhalten nach Wiedemann (siehe Unterabschnitt 2.2.4) findet man in Abbildung 51 eine Folgefahrt des ersten Probanden. In dieser ergab sich zunächst eine Annäherung an das vorausfahrende Fahrzeug. Bei Erreichen des gewünschten Folgeabstands stellte sich eine Oszillation um die entsprechende Distanz ein. Beispielsweise wurde in Abbildung 51 und Abbildung 52 eine mögliche Bestimmung des lokalen Maximalwertes der Geschwindigkeitsdifferenz dargestellt.

Die in Abbildung 51 betrachtete Simulationssekunde wurde mit einem grünen Punkt (fünfter Punkt ausgehend von der linken oberen Ecke) markiert. Durch diesen Punkt wurden zwei Geraden gelegt, welche durch die Koordinaten vorangegangener bzw. nachfolgender Simulationssekunden führen. Beispielsweise wurde in Abbildung 51 ein Abstand (zwischen der vorangegangenen bzw. nachfolgenden Simulationssekunde und der aktuell betrachteten Simulationssekunde) von vier Simulationsschritten aufgetragen. Dabei lässt sich erkennen, dass sich zwischen den beiden Geraden ein Winkel α_1 aufspannt. Dieser Winkel erfährt eine kontinuierliche Änderung bei der Analyse über die einzelnen Simulationssekunden. Dabei erreicht dieser Winkel ein Maximum, wenn in der betrachteten Simulationssekunde ein lokales Maximum (oder Minimum) der Geschwindigkeitsdifferenz herrscht (siehe Abbildung 52).



**Abbildung 51 Schematische Darstellung der Extremwertermittlung der Differenzgeschwindigkeit;
Teil 1 [eigene Darstellung]**

Zu Problemen kam es bei dieser Methode, wenn das vorausfahrende Fahrzeug die Geschwindigkeit nicht konstant hielt. In diesen Fällen kamen zusätzlich zu der Oszillation, die durch die menschlichen Imperfektionen im Folgeverhalten entsteht, weitere hohe Dynamiken hinzu, welche eine breite Masse an unterschiedlichen Situationen hervorrief. Im Rahmen dieser Masterarbeit konnten in diesem R-Skript nicht alle Sonderfälle abgedeckt werden, weshalb im weiteren Verlauf eine individuelle Auswertung der Folgeverhalten stattfand. Dabei wurden nur jene Folgeverhalten analysiert, welche zumindest drei Durchschreitungen der 0 km/h – Geschwindigkeitsdifferenz aufwiesen. Ein Beispiel für die Erstellung einer Grafik mit individuell ausgewertetem Folgeverhalten kann dem Unterabschnitt 10.5.4 entnommen werden.



**Abbildung 52 Schematische Darstellung der Extremwertermittlung der Differenzgeschwindigkeit;
Teil 2 [eigene Darstellung]**

5.5.3 LC_Plots.R – Auswertung und grafische Darstellung einzelner Fahrstreifenwechselverhalten

Wie auch im Skript „follow_Plots.R“ werden in diesem Skript keine größeren Datenbearbeitungen mehr durchgeführt. Die primären Bearbeitungsschritte haben sich auf das Einlesen bestehender *.csv-Dateien, gelegentlicher Filteroperationen und das Erstellen von Grafiken beschränkt. Für die Ausführung dieses Skriptes wurde ebenfalls von allen Probanden und Szenarien ein vollständiger Durchlauf des Skriptes „Diagramms.R“ (inklusive aller durch das Skript aufgerufenen Folgeskripte) vorausgesetzt. Der vollständige R-Code kann dem digitalen Anhang entnommen werden.

6 Ergebnisse

Nachdem VISSIM in den *.fzp-Dateien ausschließlich diskrete Daten protokolliert, finden sich in allen nachfolgenden Diagrammen ausschließlich Darstellungen diskreter Daten. Diese wurden mit einer Frequenz von 20 Hz aufgezeichnet und ausgewertet. Das bedeutet, dass 20 Daten-Punkte in den Diagrammen eine Zeitspanne von 1 Sekunde in der Simulation abdecken. Nachdem allerdings die Punkte häufig sehr dicht nebeneinander liegen, wird in den Diagrammen zum Folgeverhalten stets die Simulationssekunde des ersten und des letzten dargestellten Punktes erwähnt.

Da bei den Simulationen eine Vielzahl an stochastischen Verteilungen integriert waren, ergaben sich viele Sonderfälle, welche eine vollständig automatisierte Auswertung der Folgeverhalten und Fahrstreifenwechselverhalten im Rahmen dieser Masterarbeit nicht erlaubten. Aus diesem Grund wurden die in den Abschnitten 6.1 und 6.2 gezeigten, einzelnen Fahrsituationen manuell ausgewertet und beschrieben. Es finden sich jedoch auch zusammenfassende Ergebnisse zu den Fahrverhalten wieder, welche etwaige Unterschiede oder Gleichheiten in Szenarien mit und ohne automatisierten Fahrzeugen darstellen.

6.1 Folgeverhalten

6.1.1 Gesamtfahrt

Eine gute Möglichkeit, um einen ersten Überblick über die Fahrverhalten der Probanden zu erhalten, stellt die Analyse der fahrdynamischen Kenngrößen dar. Diese Kennwerte wurden für jeden Probanden getrennt nach den einzelnen Simulationsszenarien ausgewertet. Sie stellen somit eine Zusammenfassung der Fahrten aller Probanden getrennt nach den Szenarien dar. Die nachfolgend gezeigten Boxplots beziehen sich jeweils auf die Fahrten der Probanden innerhalb des in Abbildung 9 dargestellten Bereiches, in dem die VISSIM-Fahrzeuge eine Wunschgeschwindigkeit entsprechend der höchstzulässigen Geschwindigkeit auf österreichischen Autobahnen besitzen.

Abbildung 53 zeigt, wie lange die Probanden in den jeweiligen Szenarien im Bereich der höchstzulässigen Geschwindigkeit gefahren sind. Auffällig ist dabei, dass im Szenario SAE4_1.8 der Median der Fahrdauern 20 Sekunden über jenem von Szenario SAE0 und sogar 30 Sekunden über jenem von Szenario SAE4_0.9 lagen. Aufgrund der Definition einer variablen Startposition der Auswertungen, wurde an dieser Stelle eine Überprüfung des Zusammenhangs zwischen der Position des Ego-Fahrzeugs beim Start der Auswertungen und der Fahrdauer nötig. In Unterabschnitt 10.5.6 findet sich ein Auszug aus dem R-Code, über welchen ein Zusammenhang zwischen der Fahrdauer und der Fahrzeugposition bei Start der Auswertungen untersucht wurde. Die Überprüfung zeigte, dass ein Zusammenhang zwischen diesen beiden Parametern besteht. Dabei lässt sich die Fahrdauer allerdings nur mit einem adjustierten Bestimmtheitsmaß von rund 6% über die Fahrzeugpositionen bei dem Start der Auswertungen beschreiben. Aus diesem Grunde wurden zusätzlich die durchschnittlichen Geschwindigkeiten innerhalb der berücksichtigten Strecke berechnet.

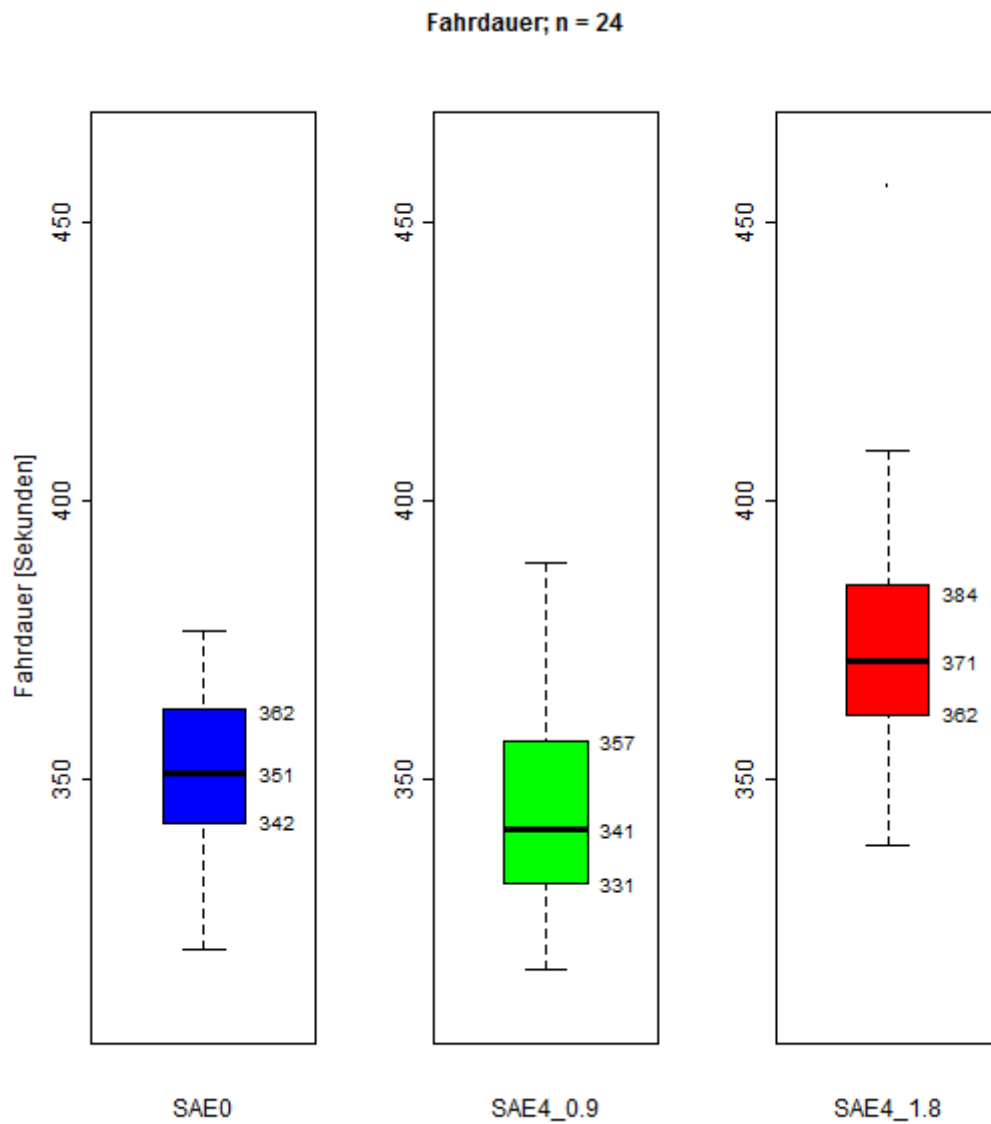
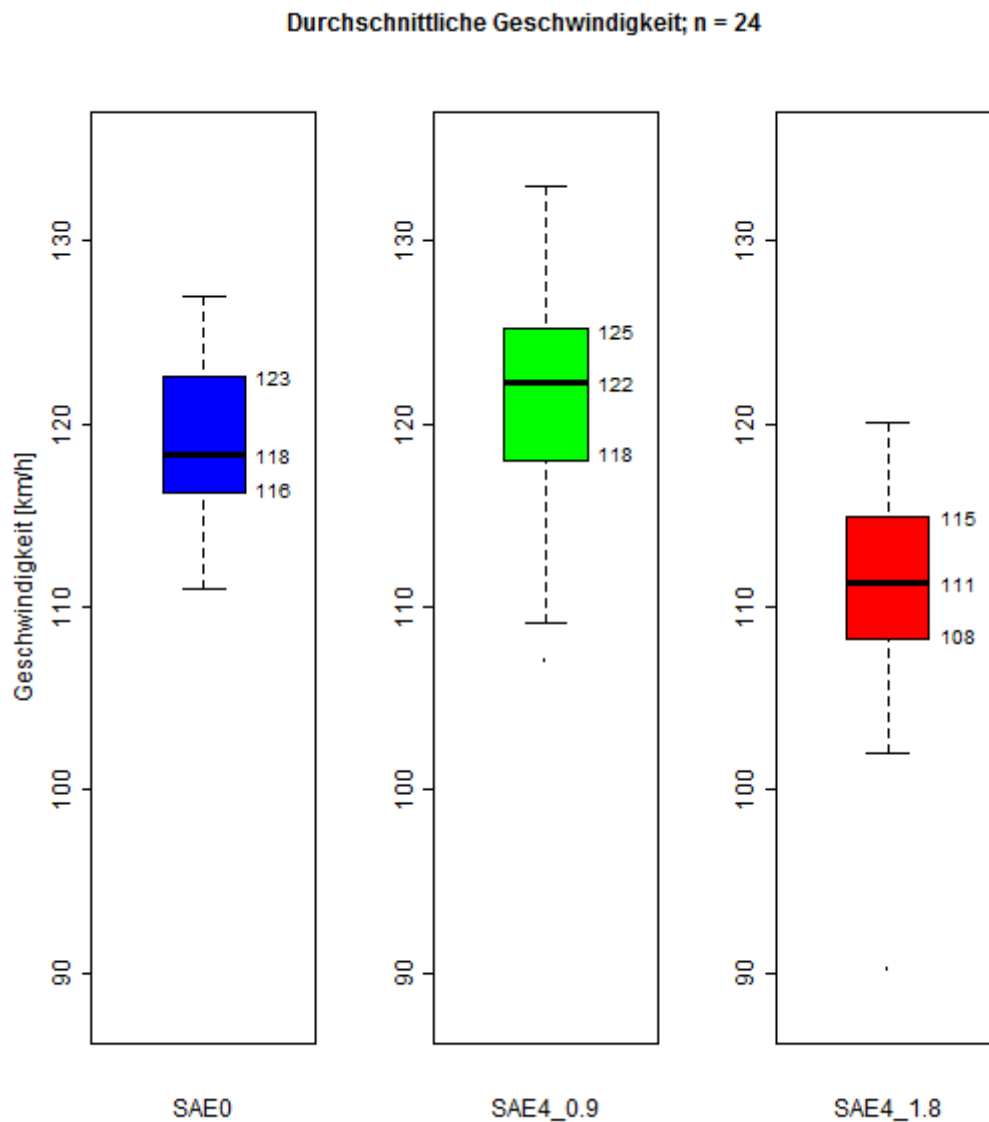
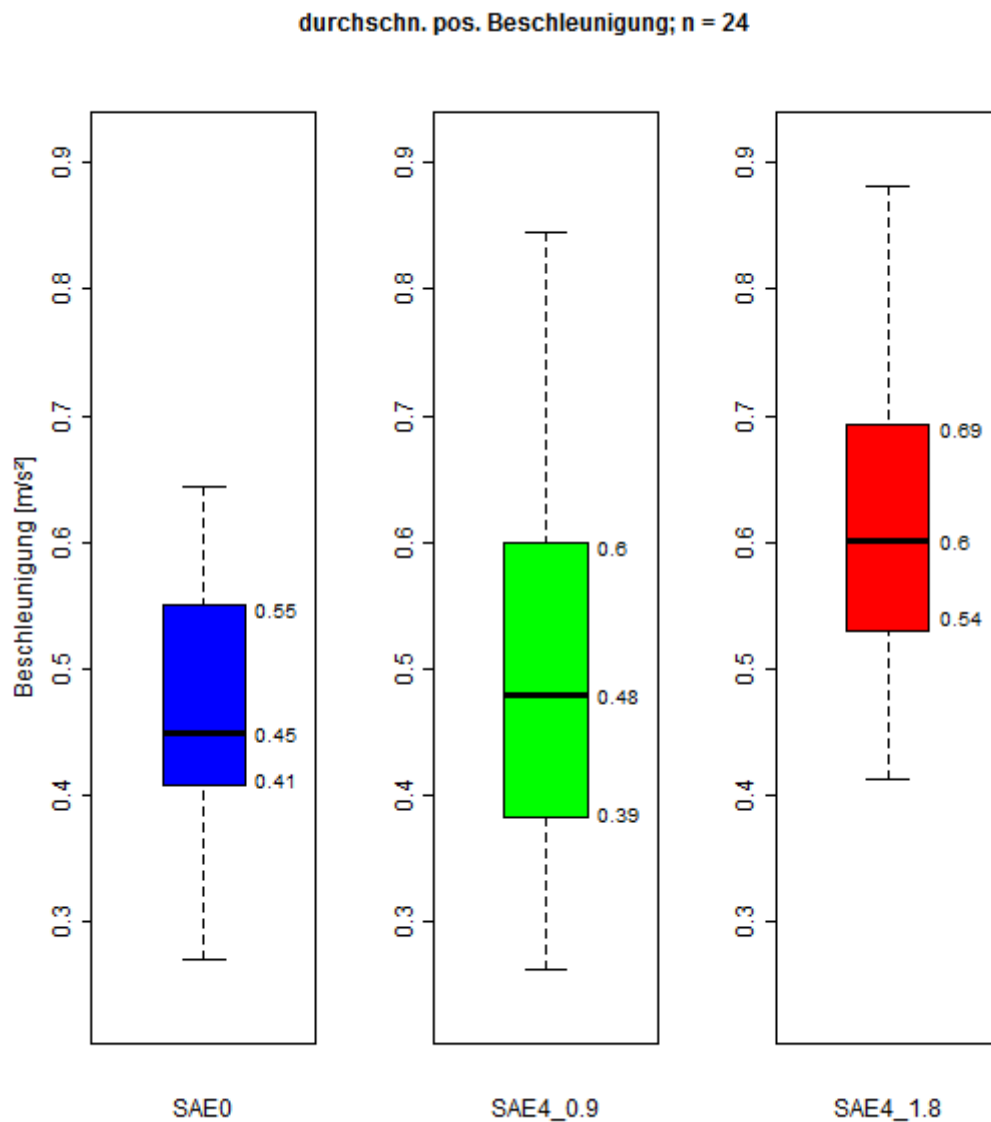


Abbildung 53 Fahrdauern aufgeschlüsselt nach den Szenarien [eigene Darstellung]



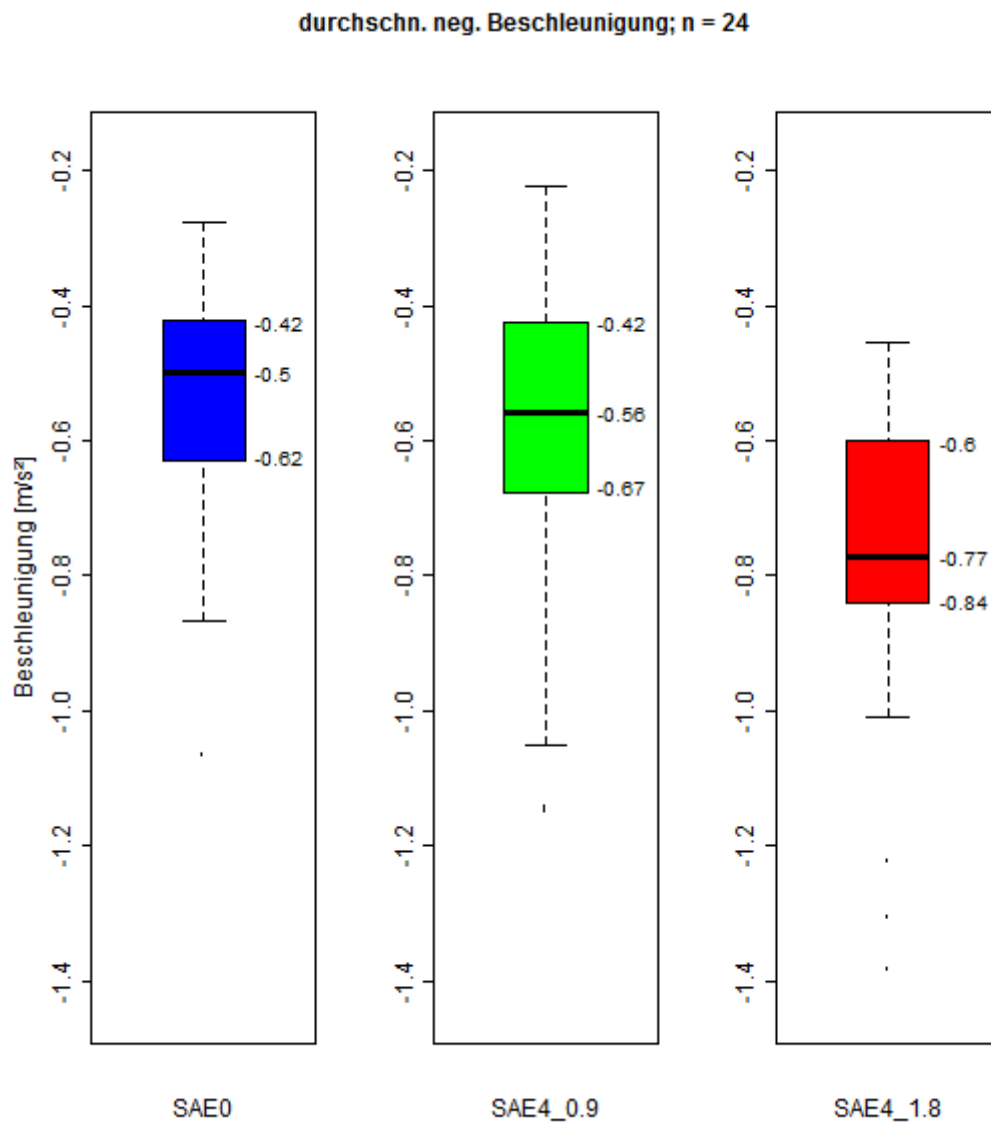
**Abbildung 54 Durchschnittliche Geschwindigkeiten aufgeschlüsselt nach den Szenarien
[eigene Darstellung]**

Im Vergleich zu den Fahrdauern erlauben die durchschnittlichen Geschwindigkeiten eher einen direkten Vergleich der Fahrten, da die jeweiligen betrachteten Streckenlängen auf die Fahrdauern innerhalb der betrachteten Strecken bezogen wurden. Wie auch in Abbildung 53 zeigt sich, dass die Probanden in Szenario SAE4_1.8 eine niedrigere durchschnittliche Reisegeschwindigkeit hatten (bzw. vergleichsweise eine längere Zeit im jeweils ausgewerteten Bereich gefahren sind). Dies kann bedeuten, dass die Probanden durchschnittlich etwas langsamer fahren, wenn die Fahrzeuge in ihrer näheren Umgebung ein Fahrverhalten entsprechend dem in Szenario SAE4_1.8 gezeigten Fahrverhalten aufweisen. In den Szenarien SAE0 und SAE4_0.9 weisen die Probanden ähnliche durchschnittliche Geschwindigkeiten auf. So fahren die Probanden im Szenario SAE4_0.9 um rund 3% schneller bzw. im Szenario SAE4_1.8 um rund 6% langsamer als im Referenzszenario SAE0.



**Abbildung 55 Durchschnittliche positive Beschleunigung aufgeteilt nach den Szenarien
[eigene Darstellung]**

Abbildung 55 zeigt, einen Median von $0,45 \text{ m/s}^2$ bei den durchschnittlichen positiven Beschleunigungen der Probanden im Szenario SAE0. Im Szenario SAE4_0.9 liegt der Median der durchschnittlichen positiven Beschleunigungen nur $0,03 \text{ m/s}^2$ über jenem von Szenario SAE0. Anhand des größeren Interquantilbereichs kann man eine breitere Streuung der durchschnittlichen positiven Beschleunigungen erkennen. Szenario SAE4_1.8 hob sich bei den Auswertungen abermals von den anderen beiden Szenarien ab. So traten im Szenario SAE4_1.8 durchschnittliche Beschleunigungen auf welche um 33% höher waren als jene im Szenario SAE0. Unter Berücksichtigung der niedrigeren durchschnittlichen Geschwindigkeiten in diesem Szenario deutet ein höherer Wert bei den durchschnittlichen positiven Beschleunigungen auf eine höhere Anzahl an „Anfahrprozessen“ hin.



**Abbildung 56 Durchschnittliche negative Beschleunigung aufgeteilt nach den Szenarien
[eigene Darstellung]**

Die Boxplots der durchschnittlichen negativen Beschleunigungen zeigen, dass sich bei den Probanden in den Szenarien SAE0 und SAE4_0.9 üblicherweise eine geringere durchschnittliche Verzögerung als im Szenario SAE4_1.8 ergab. So lag der Median der durchschnittlichen negativen Beschleunigung im Szenario SAE4_1.8 um rund 40% über jenem des Szenarios SAE0.

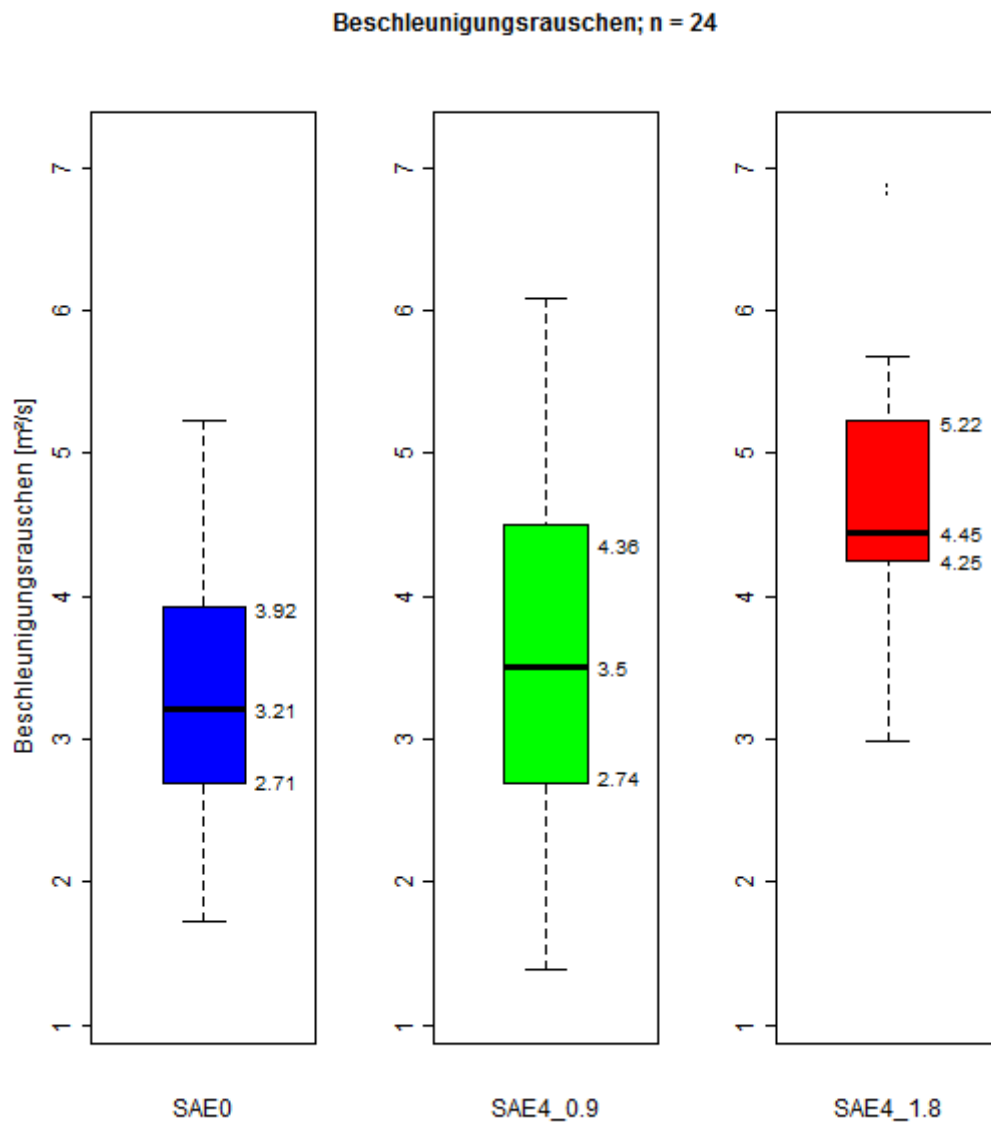
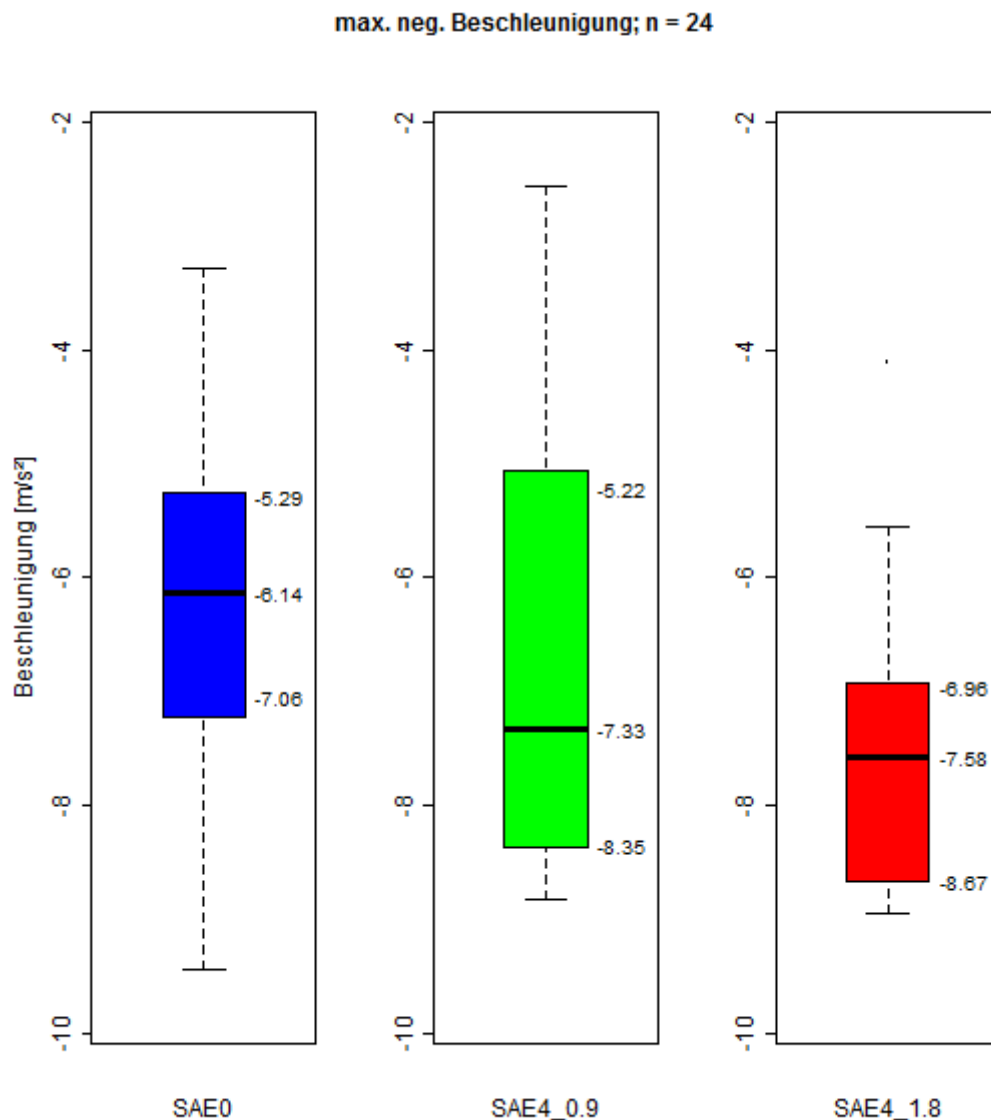


Abbildung 57 Beschleunigungsrauschen im Fahrverhalten der Probanden aufgeteilt nach den Szenarien [eigene Darstellung]

Die Standardabweichung der Beschleunigung stellt ein Maß über die Homogenität der Bewegung/Fahrt im Verkehrsfluss dar. Je gleichmäßiger die Fahrt war, desto weniger Beschleunigungsrauschen tritt auf. Umgekehrt gilt: je häufiger und stärker die Beschleunigungen und Verzögerungen desto höher der Wert des Beschleunigungsrauschens. Abbildung 57 zeigt, dass im Fahrverhalten der Probanden in Szenario SAE4_1.8 das höchste Beschleunigungsrauschen zustande kam. In diesem Szenario haben die Probanden häufiger/stärker verzögert und erneut beschleunigt.



**Abbildung 58 Maximale negative Beschleunigungen aufgeteilt nach den Szenarien
[eigene Darstellung]**

Als letzte fahrdynamische Kenngröße wurde die maximale negative Beschleunigung je Proband und Szenario in Abbildung 58 dargestellt. Unter Berücksichtigung, dass die üblicherweise bei einer Fahrt auftretenden Verzögerungen auf der Autobahn in etwa bei 1 m/s^2 liegen (Vgl. Kölbl et al. [2015]) zeigt sich, dass alle Probanden in jedem Szenario eine starke Bremsung durchführten. Dabei stellen Verzögerungen um die $7 - 8 \text{ m/s}^2$ bereits eine Vollbremsung dar. In den Szenarien SAE4_0.9 und SAE4_1.8 wurde somit von mehr als der Hälfte der Probanden zumindest eine Vollbremsung im Szenario durchgeführt. Doch auch im Szenario SAE0 trat bei rund 25% der Probanden eine Situation auf, in welcher eine Vollbremsung durchgeführt wurde. In dem Video-Material ist ersichtlich, dass diese starken Verzögerungen einerseits bei Fahrstreifenwechsel von VISSIM-Fahrzeugen auf den FS vor dem Ego-Fahrzeug auftraten und andererseits bei stärkeren Verzögerungen eines vorausfahrenden VISSIM-Fahrzeugs (in Folgefahrten), da die Bremslichter häufig übersehen wurden. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich bei der Analyse der fahrdynamischen Kenngrößen bei den einzelnen Szenarien im Durchschnitt leichte Abweichungen im Fahrverhalten ergeben haben. Diese Abweichungen beziehen sich allerdings auf die gesamte Fahrt (diese beinhaltet Folgefahrten,

FS-Wechsel und Fahrten ohne Beeinflussung durch ein vorausfahrendes Fahrzeug) der Probanden im betrachteten Bereich. Nachfolgend sollen gezielt einzelne Folgefahrten analysiert und verglichen werden.

Aus den in diesem Unterabschnitt gezeigten Ergebnissen lässt sich erkennen, dass bei den Probanden in den Szenarien SAE0 und SAE4_0.9 ein ähnliches Beschleunigungsverhalten auftrat. Im Szenario SAE4_1.8 haben die Probanden häufiger/stärker verzögert und beschleunigt. Die durchschnittliche Geschwindigkeit lag im Szenario SAE4_1.8 ebenfalls unter jener der anderen beiden Szenarien. Die fahrdynamischen Kenngrößen zeigen somit, dass die Probanden in den Szenarien SAE0 und SAE4_0.9 gleichmäßiger gefahren sind als im Szenario SAE4_1.8. Gleichzeitig haben jedoch 75% der Probanden in jedem der drei Szenarien zumindest ein Mal stark verzögert. Im Szenario SAE4_1.8 wurde sogar von 75% der Probanden zumindest eine Vollbremsung durchgeführt. Eine detailliertere Analyse der Fahrverhalten ermöglichen die in Unterabschnitt 6.1.2 gezeigten Ergebnisse.

6.1.2 Folgefahrten

Anhand von Abbildung 59 wird dargestellt, wie die Diagramme des Folgeverhaltens gelesen und interpretiert werden können. In dieser Abbildung wird eine kurze Folgefahrt gezeigt. Da das Vorderfahrzeug die Geschwindigkeit über die gesamte Folgefahrt konstant hält, beruhen alle Änderungen der Differenzgeschwindigkeit auf dem Wunsch des Probanden, den Folgeabstand konstant zu halten. Der Start des in Abbildung 59 gezeigten Folgeverhaltens wird durch den blauen Punkt, bei einer Distanz von rund 42 m und ca. 8 km/h Geschwindigkeitsdifferenz, markiert. Das Ende wird durch einen orangen Punkt bei einer Distanz von etwa 20,50 m und einer Differenzgeschwindigkeit von ca. -3,50 km/h dargestellt. Die Distanzen und Differenzgeschwindigkeiten beziehen sich dabei auf das Ego-Fahrzeug (welches durch den Probanden gesteuert wurde) und das vorausfahrende VISSIM-Fahrzeug (Fzg-ID = 289). Auf eine Angabe der Fahrzeug-ID des vorausfahrenden Fahrzeugs innerhalb der Grafik wurde bei der Erstellung der Diagramme aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. Für die Beurteilung des Fahrverhaltens der Probanden spielt diese zudem keine Rolle. Sollte die ID der VISSIM-Fahrzeuge dennoch für nachträgliche Auswertungen erforderlich sein, sei an dieser Stelle vermerkt, dass die Fzg-IDs und weitere Daten in den Tabellen mit „interessanten Situationen“ (siehe Kapitel 5.3.1) vermerkt sind.

Ausgehend vom Startpunkt erkennt man, dass eine positive Geschwindigkeitsdifferenz (das Ego-Fahrzeug besitzt eine höhere momentane Geschwindigkeit als das VISSIM-Fahrzeug) zu einer Reduktion der Distanz zwischen den Fahrzeugen führt. Bei einer Distanz von ca. 18,50 m (in Abbildung 59 mit einem Pfeil markiert) beginnt das Ego-Fahrzeug die Geschwindigkeit stärker zu reduzieren, um die Distanz halten zu können. Durch die erste Verzögerung fällt der Proband etwa 6 m weiter zurück (von Distanz von 15,63 m auf 21,74 m) und pendelt sich bei einer Distanz von ungefähr 21 m zum vorausfahrenden Fahrzeug ein.

Die etwas größer geschriebenen Geschwindigkeitsangaben sind die tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten zu dem Zeitpunkt, wenn die Differenzgeschwindigkeit zwischen dem vorausfahrenden VISSIM-Fahrzeug und dem Ego-Fahrzeug gleich 0 km/h beträgt. Zwischen dieser Geschwindigkeitsangabe und dem dazugehörigen Punkt in der Grafik befindet sich die Angabe zur momentanen Distanz zwischen den beiden Fahrzeugen. Zusätzlich findet man Angaben zu den lokalen maximalen Geschwindigkeitsabweichungen (sowohl positiv als auch negativ) und den dazugehörigen Distanzen wieder. Diese Angaben dienen zur erleichterten Abschätzung der Werte bei einer Untersuchung der Oszillation.

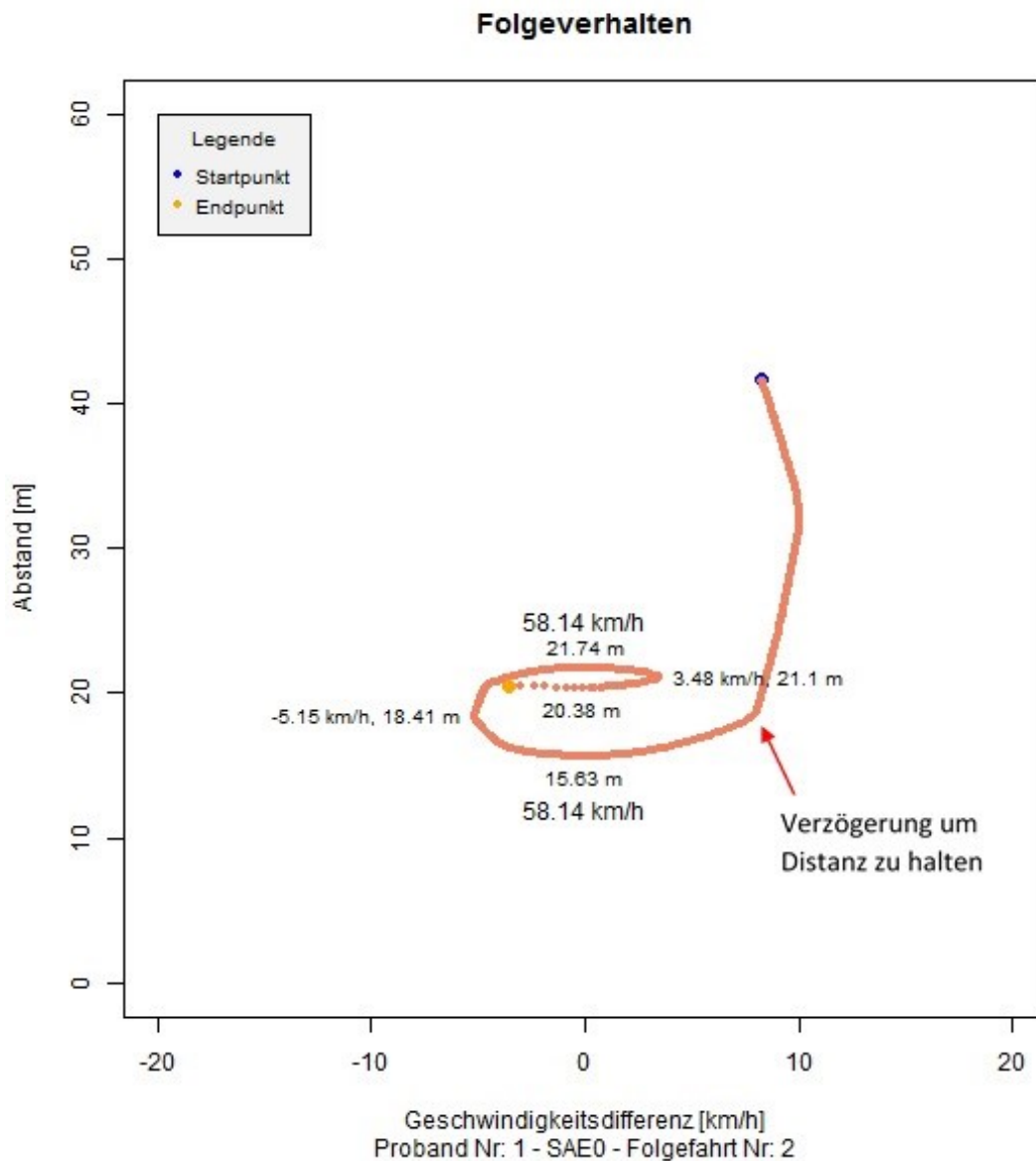


Abbildung 59 Folgeverhalten von Proband 1 – SAE0 – bei rund 60 km/h

Über die Angabe der Geschwindigkeit und die dazugehörigen Distanzen zwischen den Fahrzeugen lässt sich der Folgeabstand in Sekunden berechnen. In dieser Folgefahrt entspricht der zeitliche Folgeabstand des Probanden in etwa 1,3 Sekunden⁷. Da das VISSIM-Fahrzeug die Geschwindigkeit während der gesamten Folgefahrt konstant gehalten hat, wird davon ausgegangen, dass die aufgezeichneten Abweichungen der Geschwindigkeiten (Differenzgeschwindigkeiten während der Folgefahrt) als eine Folge der menschlichen Wahrnehmungsschwellen auftreten.

Die Gesamtdauer der Folgefahrt (inklusive Annäherungsfahrt) in Abbildung 59 lag bei lediglich 20,6 Sekunden. Bei längeren Folgefahrten wird die Oszillation um eine gewünschte Folgedistanz besser sichtbar – siehe Abbildung 60 und Abbildung 61.

⁷ Unter der Berücksichtigung, dass 58 km/h in etwa 16,1 m/s entsprechen, kann der zeitliche Abstand mit $\frac{21\text{ m}}{16,1\text{ m/s}}$ ausgerechnet werden und ergibt so rund 1,3 Sekunden.

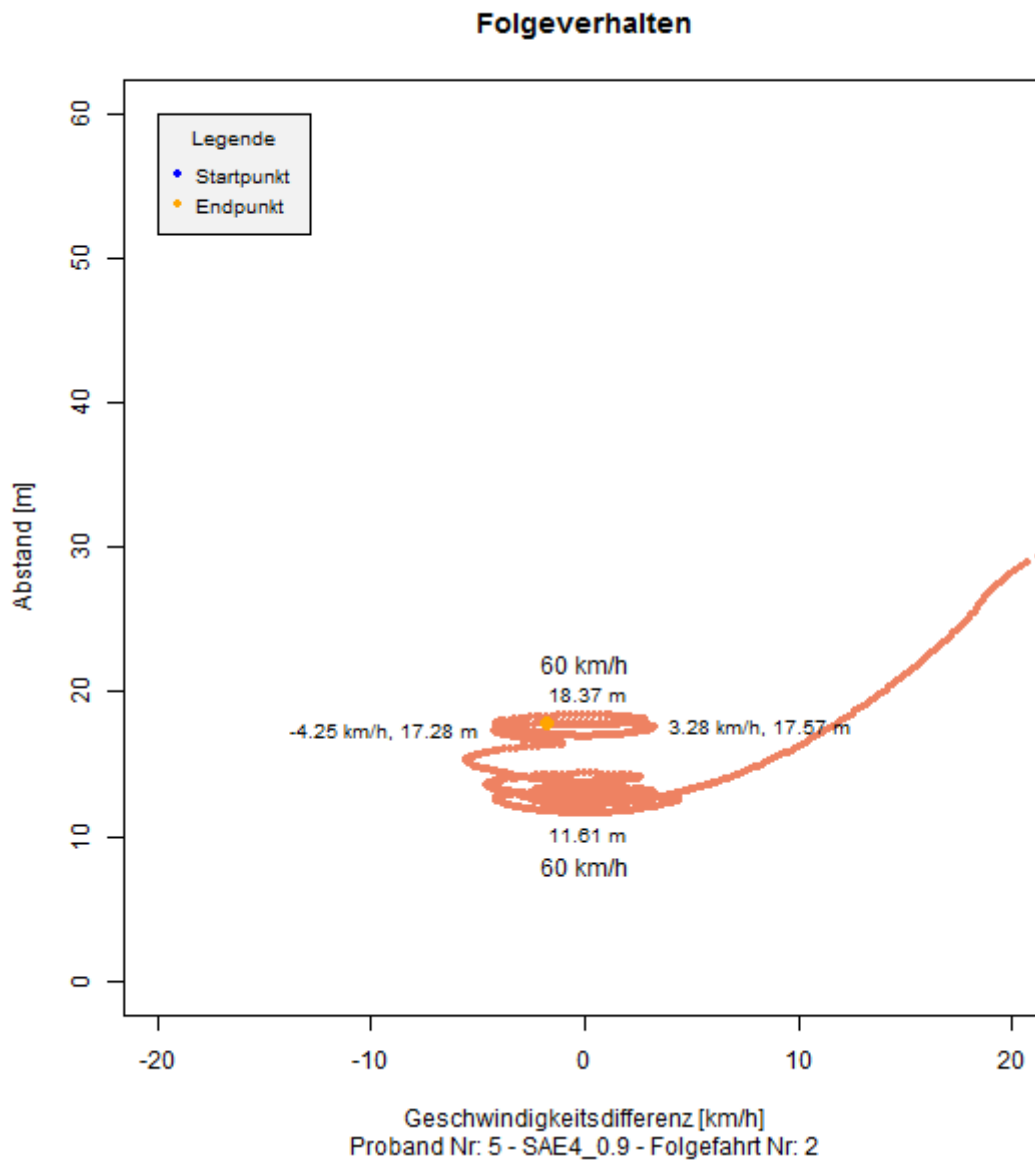


Abbildung 60 Folgeverhalten von Proband 5 - SAE4_0.9 - bei 60 km/h

In Abbildung 60 fährt das VISSIM-Fahrzeug exakt 60 km/h während der gesamten Folgefahrt. Dabei tritt eine Oszillation um zwei unterschiedliche Distanzen auf. Anfangs hält Proband 5 eine Distanz von etwa 13 m zum Vorderfahrzeug. Das entspricht einem Folgeabstand von rund 0,8 Sekunden. Nach rund 22 Sekunden fiel der Proband auf eine Distanz von etwa 17,50 m zurück (Folgeabstand \approx 1,0 Sekunden). Diese Distanz wurde gehalten, bis der Proband die Simulationsstrecke am Ende der Strecke, nach rund 7 weiteren Sekunden, verließ.

In diesem Szenario (SAE4_0.9) halten die VISSIM-Fahrzeuge (wie unter Kapitel 3.1.6 beschrieben) exakt die erlaubten Geschwindigkeiten ein. Da am Ende der Simulationsstrecke die Geschwindigkeit auf 60 km/h reduziert wurde, um einen stockenden Verkehr zu simulieren, wird die abweichende Geschwindigkeitsdifferenz und die daraus resultierende Oszillation (ähnlich wie in Abbildung 59 bei Proband 1 gezeigt) der menschlichen Wahrnehmung zugeschrieben.

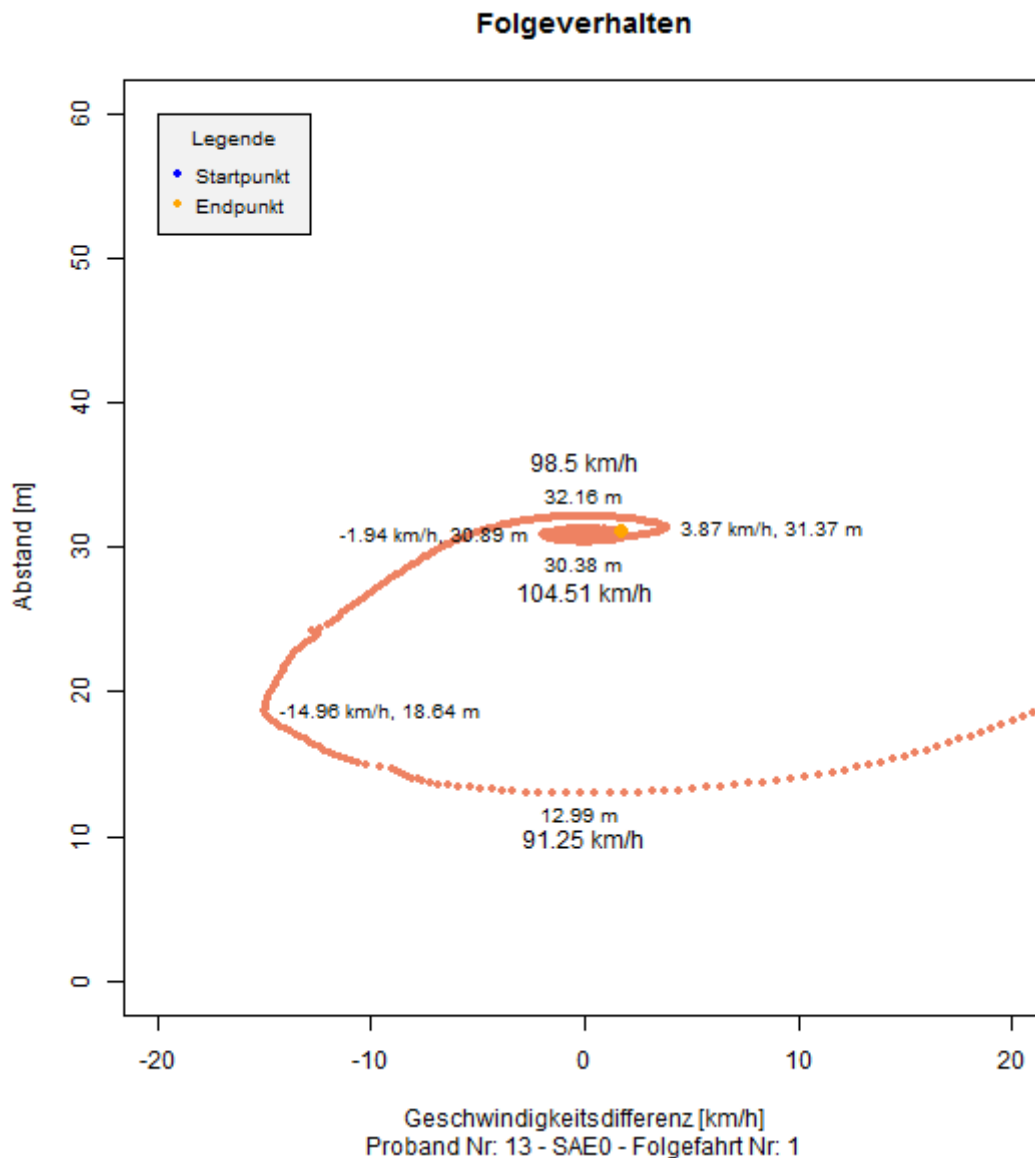


Abbildung 61 Folgeverhalten von Proband 13 – SAE0 – bei ca. 100 km/h

In Abbildung 61 verzögerte das vorausfahrende VISSIM-Fahrzeug zu Beginn und beschleunigte anschließend wieder. Proband 13 unterschritt (wie auch Proband 1 in Abbildung 59) anfangs die gewünschte Folgedistanz und senkte auch die Geschwindigkeit stärker ab (rund 15 km/h) als das vorausfahrende VISSIM-Fahrzeug, um die gewünschte Folgedistanz herzustellen. Beim Erreichen der Wunschkonzanz beschränkte sich die Geschwindigkeitsdifferenz (trotz leichter Beschleunigung des vorausfahrenden Fahrzeugs) auf kleine Abweichungen, wodurch die Distanz relativ konstant gehalten werden konnte. In Summe dauerte dieser Folgevorgang rund 28 Sekunden. Anhand dieses Beispiels lässt sich allerdings bereits vermuten, dass das Fahrverhalten des vorausfahrenden Fahrzeugs erheblichen Einfluss auf das Folgeverhalten (bezogen auf Differenzgeschwindigkeit und die Distanzen zwischen den beiden Fahrzeugen) hat. Kommen nun also noch Dynamiken durch andere Fahrzeuge im Verkehrsfluss (z.B. bei Geschwindigkeitsänderungen des vorausfahrenden Fahrzeugs) hinzu, ist eine deutlich größere Oszillation (mit höheren Differenzgeschwindigkeiten und Schwankungen der Distanz zwischen den Fahrzeugen) bei den nachfolgenden Fahrzeugen wahrzunehmen (siehe Abbildung 62).

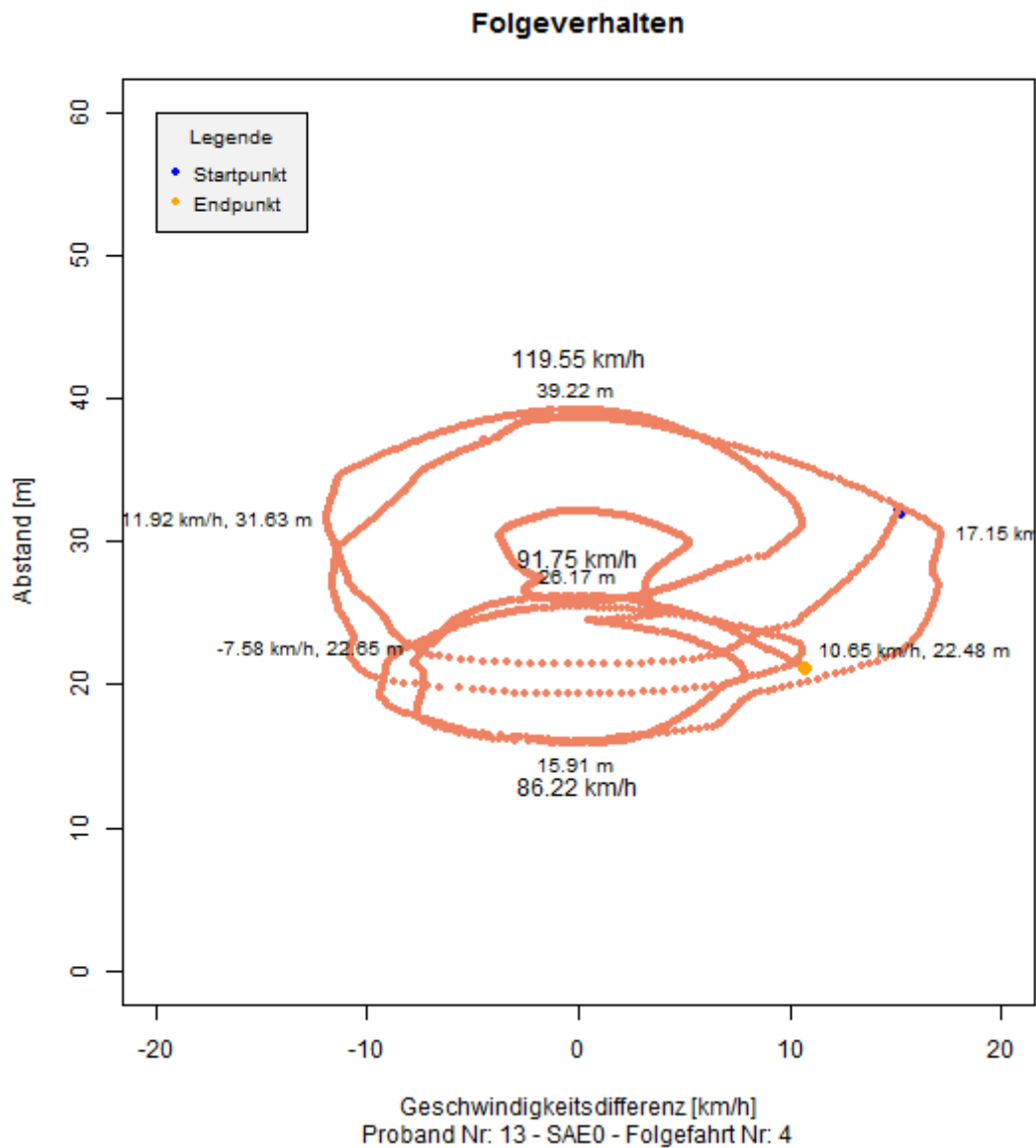


Abbildung 62 Folgeverhalten von Proband 13 – SAE0 – 85 bis 120 km/h

Die Geschwindigkeiten des vorderen Fahrzeugs bewegten sich während dieser Folgefahrt zwischen rund 80 km/h und 120 km/h. Bei Proband 13 ergab sich bei diesen Dynamiken vermehrt Geschwindigkeitsdifferenzen um die 10 km/h und darüber, wodurch auch die Folgedistanz zwischen 16 m und 40 m schwankte.

Aufgrund der Stochastik in den Szenarien traten bei den einzelnen Probanden vergleichbare Situationen allerdings nur selten auf. Ein direkter Vergleich der Szenarien eines einzelnen Probanden war kaum möglich. Zusätzlich fanden sich nicht bei allen Probanden Folgefahrten (laut den in Unterabschnitt 5.5.2 definierten Bedingungen) in allen Szenarien wieder. Wagner [2016] führt aus, dass die Schwankung der Folgeabstände nicht (ausschließlich) von der Verschiedenheit der Fahrer abhängt, da selbst bei einem Fahrer verschiedene Faktoren Einfluss auf den Folgeabstand nehmen können. Aus diesen Gründen wurde das Folgeverhalten aller Probanden bezogen auf ein Szenario ausgewertet.

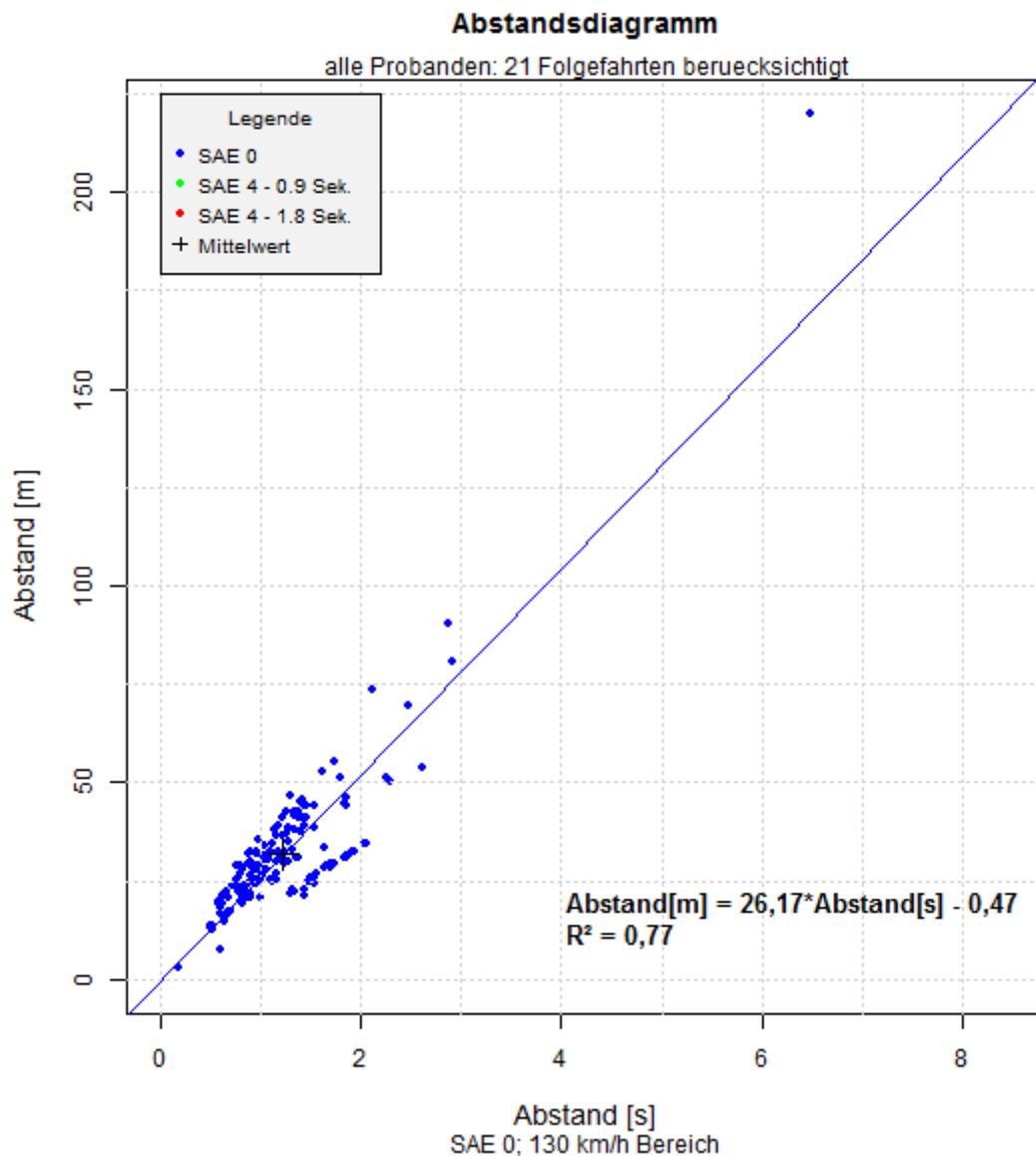


Abbildung 63 Abstandsdiagramm der Folgefahrten im Bereich mit 130 km/h – SAE0

In Abbildung 63 findet man eine Zusammenfassung der Folgefahrten von Szenario „SAE0“ von unterschiedlichen Probanden. Dabei wurden lediglich Folgefahrten betrachtet, welche sich im Bereich mit 130 km/h ergaben. Die eingetragenen Punkte beschreiben jeweils die Distanz zwischen den Fahrzeugen gemessen in Meter und den Folgeabstand gemessen in Sekunden zu dem Zeitpunkt, in dem das Ego-Fahrzeug und das VISSIM-Fahrzeug die selbe Geschwindigkeit bei Folgefahrten besitzen. Für Abbildung 61 bedeutet das somit, dass sich ein Punkt bei 12,99 m und bei 0,51 Sekunden⁸ (bei dem ersten Unterschreiten der 0 km/h Geschwindigkeitsdifferenz) ergibt. Ein weiterer Punkt liegt bei 32,16 m und einem Folgeabstand von 1,18 Sekunden⁹ und so weiter. Da hier mehrere Folgefahrten eines Szenarios in einem Diagramm vereint dargestellt wurden, erhält man eine Annäherung der durchschnittlichen Abstände bei Folgefahrten. Dabei bemerkt man, dass zwischen 0,9 Sekunden und 1,4 Sekunden Folgeabstand eine Ansammlung an Punkten auftritt. Das

⁸ mit 91,25 km/h = 25,35 m/s ergibt sich über $\frac{12,99 \text{ m}}{25,35 \text{ m/s}}$ eine Folgeabstand von 0,51 Sekunden

⁹ mit 98,5 km/h = 27,36 m/s ergibt sich über $\frac{32,16 \text{ m}}{27,36 \text{ m/s}}$ ein Folgeabstand von 1,18 Sekunden

entspricht der in diesem Szenario im Durchschnitt eingehaltenen Folgedistanz der Probanden. Im Mittel haben die Probanden somit bei Folgefahrten einen Folgeabstand von ca. 1,2 Sekunden und eine Distanz von ca. 31,7 Metern (in dem Diagramm durch ein schwarzes Kreuz dargestellt) eingehalten. Daraus ergibt sich eine mittlere Geschwindigkeit bei den Folgefahrten von rund 95 km/h. Die dargestellte Trendlinie zeigt den gemittelten Zusammenhang zwischen dem Folgeabstand in Sekunden und der Distanz der beiden betrachteten Fahrzeuge in Meter. Dabei stellt die Steilheit ein Maß der Geschwindigkeit dar (unabhängig davon ob die Trendlinie durch den Nullpunkt geht oder nicht). Je steiler die Trendlinie ist, desto höher ist die durchschnittliche Geschwindigkeit bei Folgefahrten. Zusätzlich zu den Mittelwerten wurde die Mediane berechnet. Anhand der Mediane lassen sich treffendere Aussage zu den „üblichen“ Folgedistanzen in einem Szenario fällen, da Ausreißer diese nicht so sehr beeinflussen wie etwa die Mittelwerte. Bei den in Abbildung 63 berücksichtigten Folgefahrten liegen der Median der Folgeabstände bei 1,2 Sekunden und der Median der Distanzen zwischen den Fahrzeugen bei 28,9 Metern. Das Bestimmtheitsmaß für die Anpassung der Trendlinie an die dargestellte Punktwolke beträgt rund 76%.

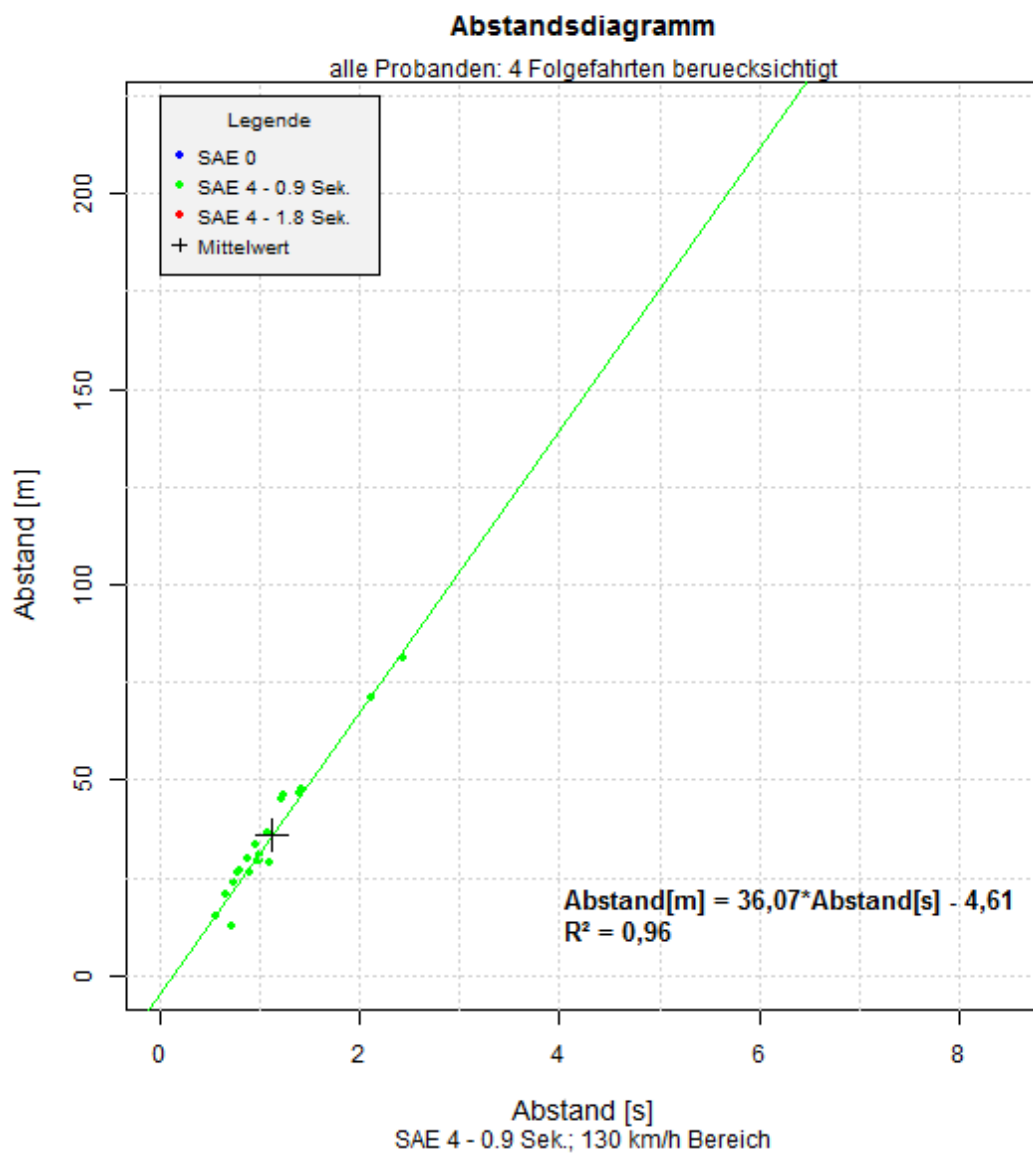


Abbildung 64 Abstandsdiagramm der Folgefahrten im Bereich mit 130 km/h – SAE4_0.9

Weit weniger Folgefahrten wurden im Szenario SAE 4 mit 0,9 Sekunden Folgeabstand zwischen den VISSIM-Fahrzeugen und dem Ego-Fahrzeug festgestellt. In Summe gab es lediglich vier Situationen in denen das Ego-Fahrzeug einem VISSIM-Fahrzeug gefolgt ist. Bei diesen vier Folgefahrten lag der Hauptteil der gemessenen Folgeabstände zwischen ca. 0,8 Sekunden und 1,4 Sekunden. Als Mittelwert wurden eine Distanz von rund 36 Metern und ein Folgeabstand von ca. 1,1 Sekunden berechnet. Daraus ergibt sich eine mittlere Folgegeschwindigkeit von rund 115 km/h. Der Median für den Folgeabstand beträgt 1,0 Sekunden und der Median der Distanzen 29,7 Meter. Bei der Interpretation bleibt allerdings zu beachten, dass nur sehr wenig Datenpunkte zur Verfügung stehen. Aufgrund der geringen Anzahl und den sehr ähnlichen Geschwindigkeiten in den berücksichtigten Folgefahrten ergibt sich bei der Trendlinie in Abbildung 64 ein Bestimmtheitsmaß von rund 96%.

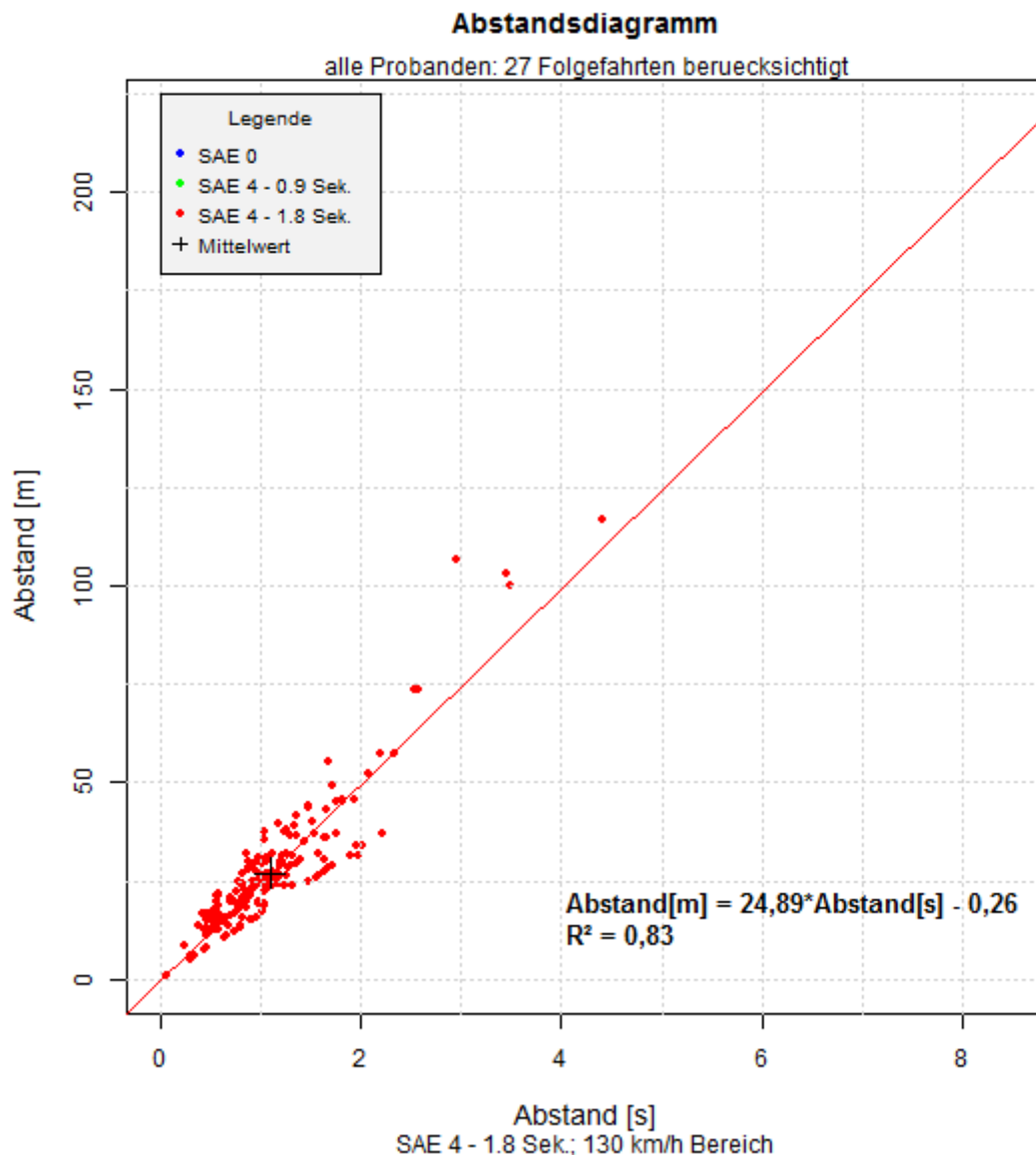


Abbildung 65 Abstandsdiagramm der Folgefahrten im Bereich mit 130 km/h – SAE4_1.8

Für Abbildung 65 standen in Summe 27 Folgefahrten bereit, welche in die Auswertung einfließen konnten. Abermals ist eine Anhäufung der gemessenen Folgeabstände zwischen rund 0,8 Sekunden und 1,5 Sekunden zu erkennen. Im Mittel wurde von den Probanden ein Folgeabstand von rund 1,1 Sekunden und 27,0 Metern eingehalten. Die daraus resultierende mittlere Geschwindigkeit ergibt rund 90 km/h. Die Mediane liegen ebenfalls sehr nahe an den Mittelwerten (Median des

Folgeabstands = 1,0 Sekunden und der Median der Distanz zwischen den Fahrzeugen = 24,4 Meter). Das Bestimmtheitsmaß für die Trendlinie liegt bei rund 83%.

In Abbildung 66 wurden zum Vergleich alle drei FASI-Szenarien (SAE0, SAE4_0.9 und SAE4_1.8) in einem Diagramm dargestellt.

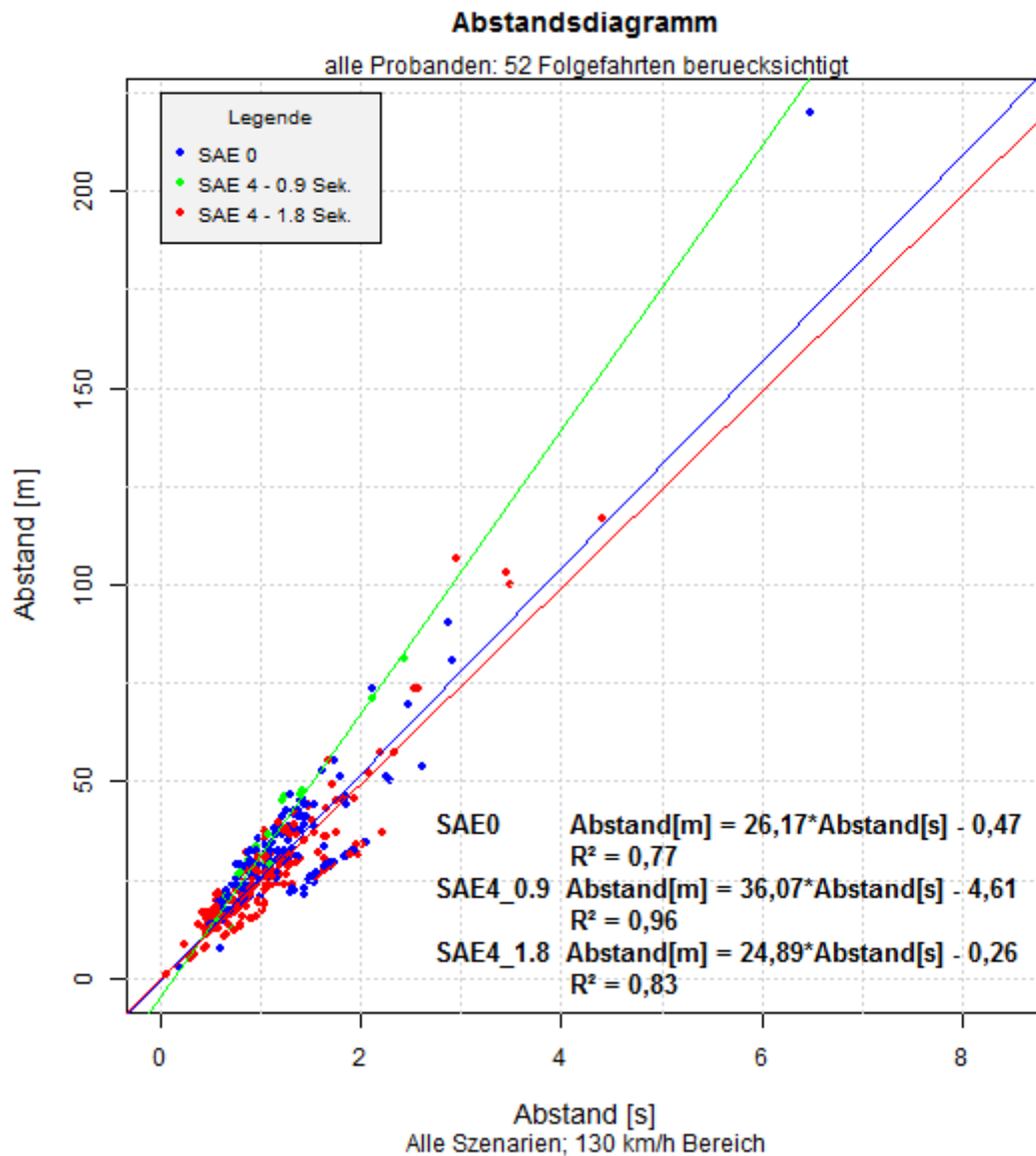


Abbildung 66 Abstandsdiagramm der Folgefahrten im Bereich mit 130 km/h – alle Szenarien

Man erkennt, dass die durchschnittlichen Geschwindigkeiten der beiden Simulationsszenarien SAE0 und SAE4, mit 1,8 Sekunden Folgeabstand, nahe beisammen liegen. Im Szenario SAE4, mit einem Folgeabstand von 0,9 Sekunden, ist die durchschnittliche Geschwindigkeit auf rund 115 km/h angestiegen. Achtet man allerdings auf die Mediane der Folgeabstände, so fällt auf, dass bei den Szenarien mit automatisiertem Fahrverhalten der VISSIM-Fahrzeuge die Probanden leicht kürzere Folgeabstände von jeweils rund 1,0 Sekunden einhielten. Bei dem Szenario in dem die VISSIM-Fahrzeuge ein menschenähnliches Fahrverhalten an den Tag legten, lag der Median der Folgeabstände bei rund 1,2 Sekunden. Für eine statistische Aussage reicht der Umfang der Stichprobe allerdings nicht aus. Vergleicht man diese Werte mit den von Wagner [2016]

präsentierten Werten, liegt eher die Vermutung nahe, dass diese geringen Abweichungen sich bei einer größeren Stichprobe aneinander annähern.

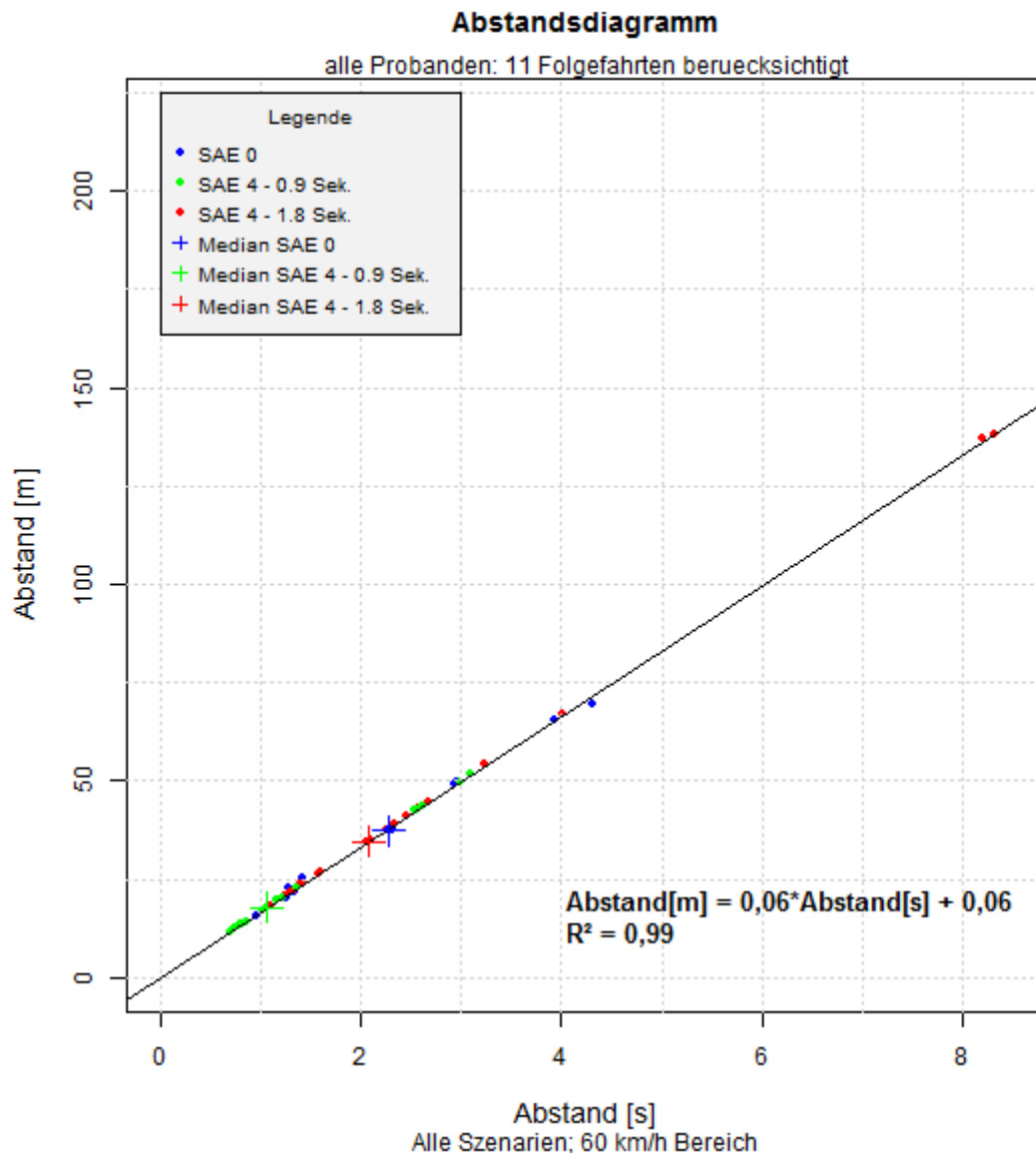


Abbildung 67 Abstandsdiagramm der Folgefahrten im Bereich mit 60 km/h – alle Szenarien

Im Bereich der Geschwindigkeitsreduktion auf 60 km/h am Ende einer jeden Simulation ergab sich eine Trendlinie mit einem Bestimmtheitsmaß von über 99%. Allerdings konnten im 60 km/h Bereich nur 3 Folgefahrten im Szenario SAE0 und jeweils nur 4 Folgefahrten in den SAE4 Szenarien ausgewertet werden. Dabei zeigte sich bei den ausgewerteten Situationen, dass die Probanden im Szenario SAE4_0.9 die geringsten Folgeabstände – mit rund 1,1 Sekunden (Median) – einhielten. Im Szenario SAE4_1.8 lag der Median des Folgeabstands bei 2,1 Sekunden und im Szenario SAE0 sogar bei 2,3 Sekunden. Allerdings sei an dieser Stelle nochmals erwähnt, dass je Szenario nur wenige Folgefahrten berücksichtigt wurden, wodurch keine Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit gezogen werden sollten.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Probanden bei den Folgefahrten in den einzelnen Szenarien ähnliche Folgeabstände (Mediane = 1,0 bis 1,2 Sekunden) eingehalten haben. In der Studie von Wagner [2016] wurden auf Basis von 28 Detektoren an 2 x 5 Querschnitten entlang der A92

(Nähe München) ca. 14 Mio. Daten von September 2015 ausgewertet. Dabei wurde ein Median von rund 1,1 Sekunden Folgeabstand zwischen den Fahrzeugen bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h festgestellt. Da bei den im Rahmen dieser Masterarbeit ausgewerteten Folgefahrten die Mediane um lediglich 0,1 Sekunden von jenem Median, welcher von Wagner [2016] ermittelt wurde, abweichen, liegt die Vermutung nahe, dass die Abweichungen in den Folgefahrten nicht auf die unterschiedlichen Fahrverhalten der VISSIM-Fahrzeuge zurückzuführen sind.

6.2 Fahrstreifenwechselverhalten

Gemäß § 11 Abs 2 StVO hat sich ein „Lenker eines Fahrzeugs“ vor einem Fahrstreifenwechsel davon zu überzeugen, dass ein solcher Wechsel gefahrlos und ohne einen anderen Straßenbenutzer zu behindern möglich ist. Bei der Untersuchung der Szenarien wird angenommen, dass diese Regelung (zumindest sinngemäß) auch von automatisierten Fahrzeuge anzuwenden sind. Hierbei sind die beiden Punkte „gefahrlos“ und „ohne einen anderen Straßenbenutzer zu behindern“ genauer zu definieren. Gerade das Nicht-Behindern anderer Verkehrsteilnehmer ist in vielen Fällen (z.B. ein Fahrstreifenwechsel bei hohem Verkehrsaufkommen oder einer lokalen Verdichtung des Verkehrs) oftmals nur schwer zu umgehen. Speziell wenn eine Ausfahrt auf der Autobahn erreicht werden soll, kommt es zu Situationen, in denen andere Verkehrsteilnehmer durch einen Fahrstreifenwechsel zumindest beeinflusst werden. Für die Unterscheidung zwischen Behinderung und Gefährdung wurden drei Fahrmanöver, wie im Unterabschnitt 5.4.3 beschrieben, analysiert. Diese Fahrmanöver könne wie folgend zusammengefasst werden:

1. Das Ego-Fahrzeug wechselt auf einen Fahrstreifen, vor ein VISSIM-Fahrzeug mit einer höheren Geschwindigkeit.
2. Das Ego-Fahrzeug wechselt auf einen Fahrstreifen, vor ein VISSIM-Fahrzeug mit einer niedrigeren Geschwindigkeit.
3. Ein VISSIM-Fahrzeug mit einer niedrigeren Geschwindigkeit wechselt vor das Ego-Fahrzeug auf dessen Fahrstreifen.

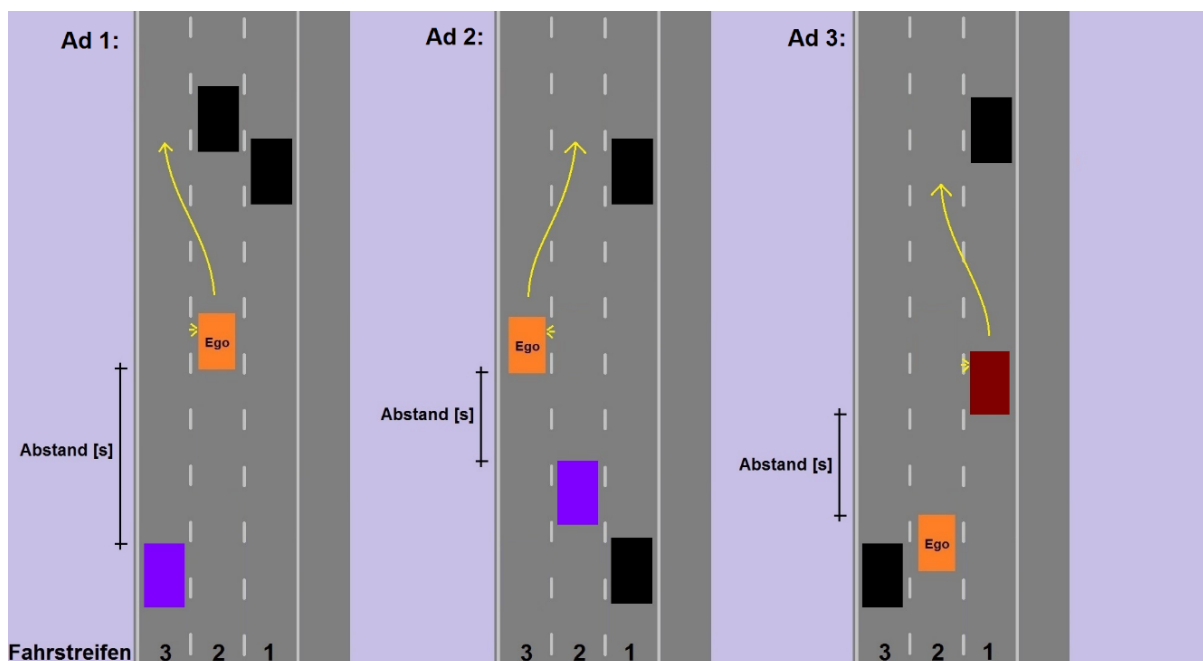


Abbildung 68 Untersuchte Fahrstreifenwechselmanöver

Um eine gute Vergleichbarkeit der eingehaltenen bzw. akzeptierten Abstände bei einem Fahrstreifenwechsel zu erhalten, wurden die Zeitabstände zwischen den Fahrzeugen für die Auswertungen herangezogen. Diese ermöglichen einen direkten Vergleich der Abstände selbst bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Dabei wurden die Zeitabstände einerseits über die Distanzen der beteiligten Fahrzeuge und die Geschwindigkeit der hinteren Fahrzeuge auf dem Zielfahrstreifen andererseits über die Distanzen der Fahrzeuge und deren Geschwindigkeitsdifferenz (siehe Abschnitt 2.5) ermittelt.

Zusätzlich musste eine Annahme bezüglich des Zeitpunktes, an dem sich der Proband für einen Fahrstreifenwechsel entschied, getroffen werden, da dieser Zeitpunkt anhand messbarer Daten nicht feststellbar war. Zur Abschätzung wurde jene Zeitspanne herangezogen, in welcher bei 90% aller VISSIM-Fahrzeuge (im Szenario SAE0) bereits ein Wechsel der Fahrstreifenummer nach dem ersten Aufkommen eines Wechselwunsches protokolliert wurde (siehe Unterabschnitt 5.4.1). Dieser Wert betrug bei den VISSIM-Fahrzeugen mit menschlichem Fahrverhalten 1,45 Sekunden. Aus diesem Grund wurde angenommen, dass die Probanden rund 1,5 Sekunden vor den protokollierten FS-Wechseln, anhand der Abstände zu den hinteren Fahrzeugen, die Entscheidungen zum Wechsel fällten.

Abbildung 69 zeigt die Ergebnisse zu den im Fahrstreifenwechselmanöver 1 beschriebenen FS-Wechselmanöver, in welchem das Ego-Fahrzeug vor ein schneller fahrendes VISSIM-Fahrzeug wechselt. Dabei symbolisieren die negativen Werte, dass sich die Zeitabstände auf Fahrzeuge hinter dem Ego-Fahrzeug beziehen (siehe auch Abbildung 45). Werte welche gleich 0 Sekunden sind, bedeuten, dass es zu einem Unfall gekommen ist. Werte, welche größer 0 Sekunden sind, stellen einen Zeitabstand zu einem Fahrzeug vor dem Ego-Fahrzeug dar.

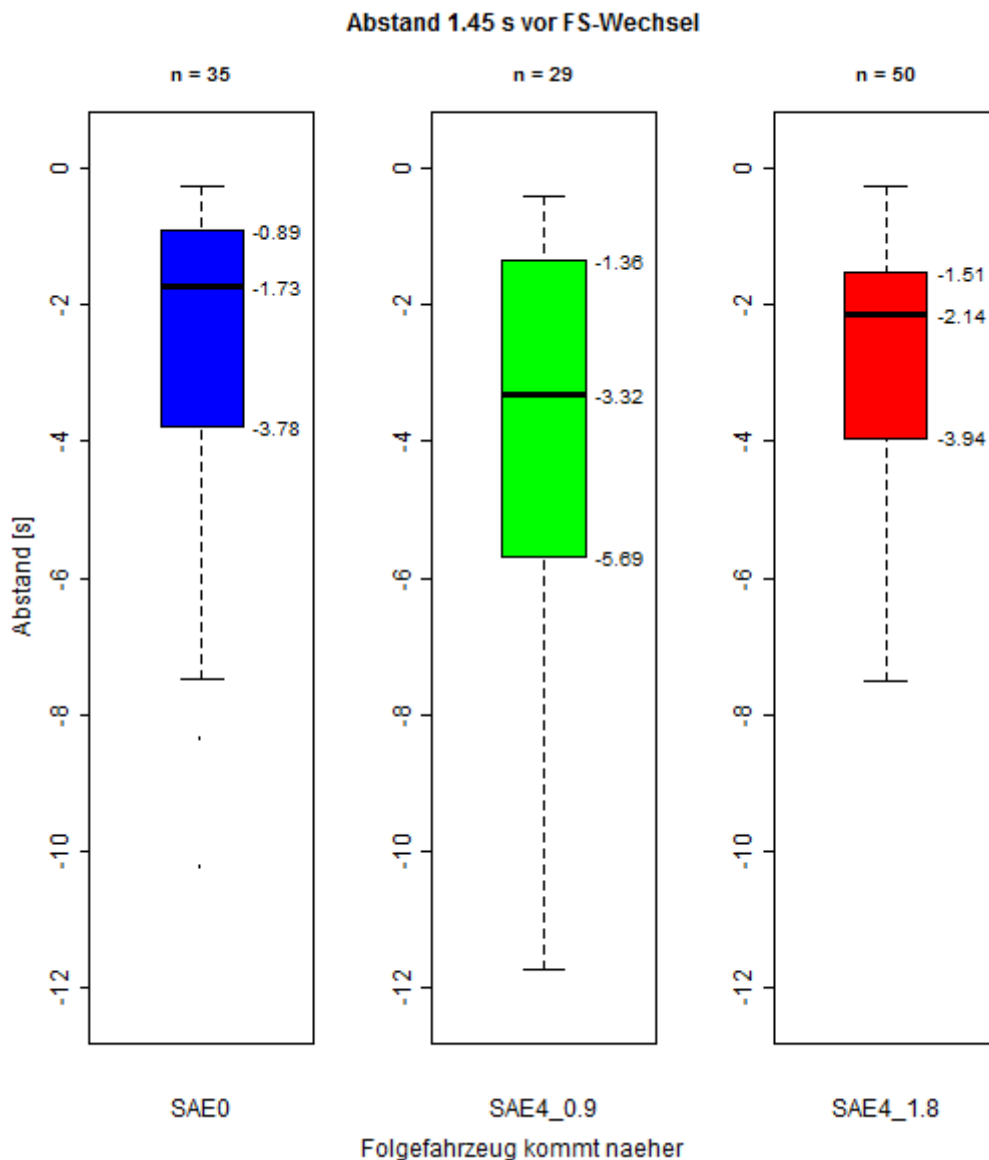


Abbildung 69 Genutzte Zeit-Lücke, um einen Fahrstreifenwechsel vor ein schnelleres Fahrzeug durchzuführen

Aus Abbildung 69 kann man entnehmen, dass durchschnittlich jeder Proband in den Szenarien ein bis zwei Fahrstreifenwechsel mit einer Einfädelung vor einem VISSIM-Fahrzeug mit höherer Geschwindigkeit durchgeführt hat. Im Szenario SAE0 wurden 50% der Fahrstreifenwechsel bereits bei einem Abstand von rund 1,73 Sekunden oder weniger durchgeführt. Jeder vierte Fahrstreifenwechsel wurde bei einem Folgeabstand von 0,89 Sekunden oder weniger durchgeführt. Drei von vier Fahrstreifenwechsel wurden bei einem Folgeabstand von 3,78 Sekunden oder weniger durchgeführt. Im Szenario SAE4_0.9 wurde im Durchschnitt ein nahezu doppelt so langer Abstand (verglichen mit Szenario SAE0) für einen FS-Wechsel gewählt. Der Median der Folgeabstände lag bei 3,32 Sekunden. In diesem Szenario haben rund einem Viertel aller Fahrstreifenwechsel einen Folgeabstand von 5,69 Sekunden oder mehr. Zeitabstände von 5 Sekunden und mehr sind für eine unmittelbare Beeinflussung oder Behinderung kaum noch relevant, wenn man das FS-Wechselverhalten betrachtet. Der Vollständigkeit halber wurden diese Fahrstreifenwechselmanöver in Abbildung 69 jedoch nicht ausgemustert. Im Szenario SAE4_1.8 wurden im Durchschnitt Sicherheitsabstände von 2.14 Sekunden eingehalten. Der durchschnittliche Abstand bei einem Fahrstreifenwechsel zu einem

nachfolgenden Fahrzeug, welches eine höhere Geschwindigkeit als das Ego-Fahrzeug hatte, lag somit um rund 24% über jenem des Szenarios SAE0. In 75% aller Fahrstreifenwechsel betrug der Sicherheitsabstand in Szenario SAE4_1.8 zumindest 1,51 Sekunden.

Berücksichtigt man neben den Distanzen nun nicht die Geschwindigkeiten der nachfolgenden Fahrzeuge, sondern die Geschwindigkeitsdifferenzen zu dem genäherten Zeitpunkt an dem sich die Probanden zu einem FS-Wechsel entschlossen haben, so ergibt sich die in Abbildung 70 gezeigte Verteilung.

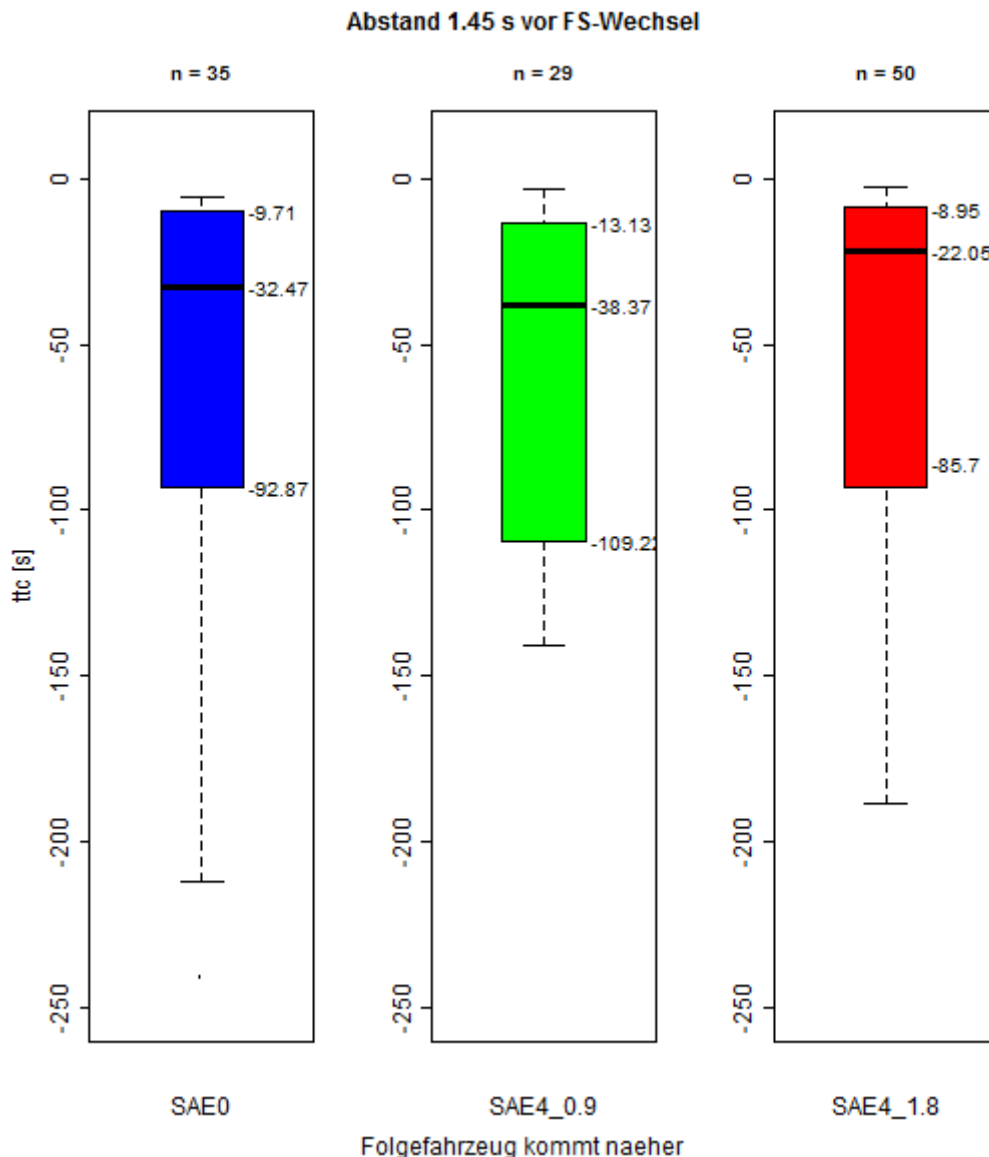


Abbildung 70 „Zeit bis zur Kollision“ im Zeitpunkt der Entscheidung zum FS-Wechsel

Abbildung 70 zeigt zum angenäherten Zeitpunkt der Entscheidung (1,45 Sekunden vor dem protokollierten Fahrstreifenwechsel) die ttc-Werte zum hinteren Fahrzeug auf dem Zielfahrstreifen. Diese Werte geben an, wieviel Zeit mit den momentanen Geschwindigkeiten der beiden Fahrzeuge vergehen muss, bevor es zu einer Kollision kommt. Somit beschreiben diese ttc-Werte, wieviel Zeit das sich annähernde VISSIM-Fahrzeug auf dem Zielfahrstreifen (zum angenäherten Zeitpunkt der Entscheidung der Probanden zum FS-Wechsel) zur Verfügung hatte, um auf den FS-Wechsel des Ego-Fahrzeugs zu reagieren und die Geschwindigkeit anzupassen. So kann beispielsweise ein sehr

kurzer Folgeabstand in Abbildung 69 bei annähernd gleichen Geschwindigkeiten zu einem großen ttc-Wert führen. Bei einem großen ttc-Wert kann das nachfolgende VISSIM-Fahrzeug ohne stärkere Verzögerungen den gewünschten Folgeabstand herstellen. In Szenario SAE0 hatten die VISSIM-Fahrzeuge (im angenäherten Zeitpunkt als sich die Probanden zu einem Fahrstreifenwechsel entschlossen haben) durchschnittlich 32,47 Sekunden Zeit um Ihre Geschwindigkeit an jene des Ego-Fahrzeugs anzupassen, oder einen Fahrstreifenwechsel durchzuführen. Bei 25% der Fahrstreifenwechsel haben die Probanden ein Zeitspanne von 9,71 Sekunden als eine ausreichende Zeitspanne für eine Reaktion der VISSIM-Fahrzeuge bei einem Fahrstreifenwechsel angesehen. Im Szenario SAE4_0.9 lag die durchschnittliche Zeit bis zur Kollision im angenäherten Zeitpunkt der Entscheidung bei 38,37 Sekunden. Ein Viertel der in Abbildung 70 gezeigten Fahrstreifenwechsel im Szenario SAE4_0.9 wies einen ttc-Wert kleiner 13,13 Sekunden auf. Auffällig ist, dass in Szenario SAE4_1.8 der Median der ttc-Werte bei 22,05 Sekunden lag (und somit rund 10 Sekunden geringer ist als im Referenzszenario SAE0). Die 25% Quantile lag bei den Fahrstreifenwechsel in diesem Szenario mit 8,95 Sekunden nur unwesentlich unter jener des Szenarios SAE0.

Es kann somit festgehalten werden, dass die Probanden bei einem FS-Wechsel vor ein schnelleres Fahrzeug, unter Berücksichtigung der Geschwindigkeitsdifferenzen, ein ähnliches Fahrverhalten in den untersuchten Situationen der drei Szenarien an den Tag gelegt haben. Es konnte somit keine Veränderung des Fahrverhaltens bei einem FS-Wechsel vor ein sich annäherndes Fahrzeug festgestellt werden.

Abbildung 71 zeigt die Ergebnisse der im Fahrstreifenwechselmanöver 2 beschriebenen Situationen, in welchen das Ego-Fahrzeug vor ein langsamerer VISSIM-Fahrzeug wechselt. Verglichen mit Abbildung 69 fällt auf, dass in jedem Szenario in Abbildung 71 eine höhere Anzahl an Fahrstreifenwechsel mit einer Einfädelung vor einem langsameren VISSIM-Fahrzeug stattfand. Die größere Häufigkeit an FS-Wechsel vor ein langsamerer Fahrzeuge könnte darauf beruhen, dass man eher dazu geneigt ist, sich vor einem langsameren Fahrzeuge einzureihen, als vor einem schnelleren. Weiters kann man feststellen, dass die Mediane in allen drei Szenarien in Abbildung 71 in etwa bei 1,5 Sekunden liegen. Es wird somit vermutet, dass das Abstandsverhalten der VISSIM-Fahrzeuge keinen Einfluss auf das Fahrstreifenwechselverhalten der Probanden hatte, sofern die VISSIM-Fahrzeuge eine niedrigere Geschwindigkeit als das Ego-Fahrzeug hatten.

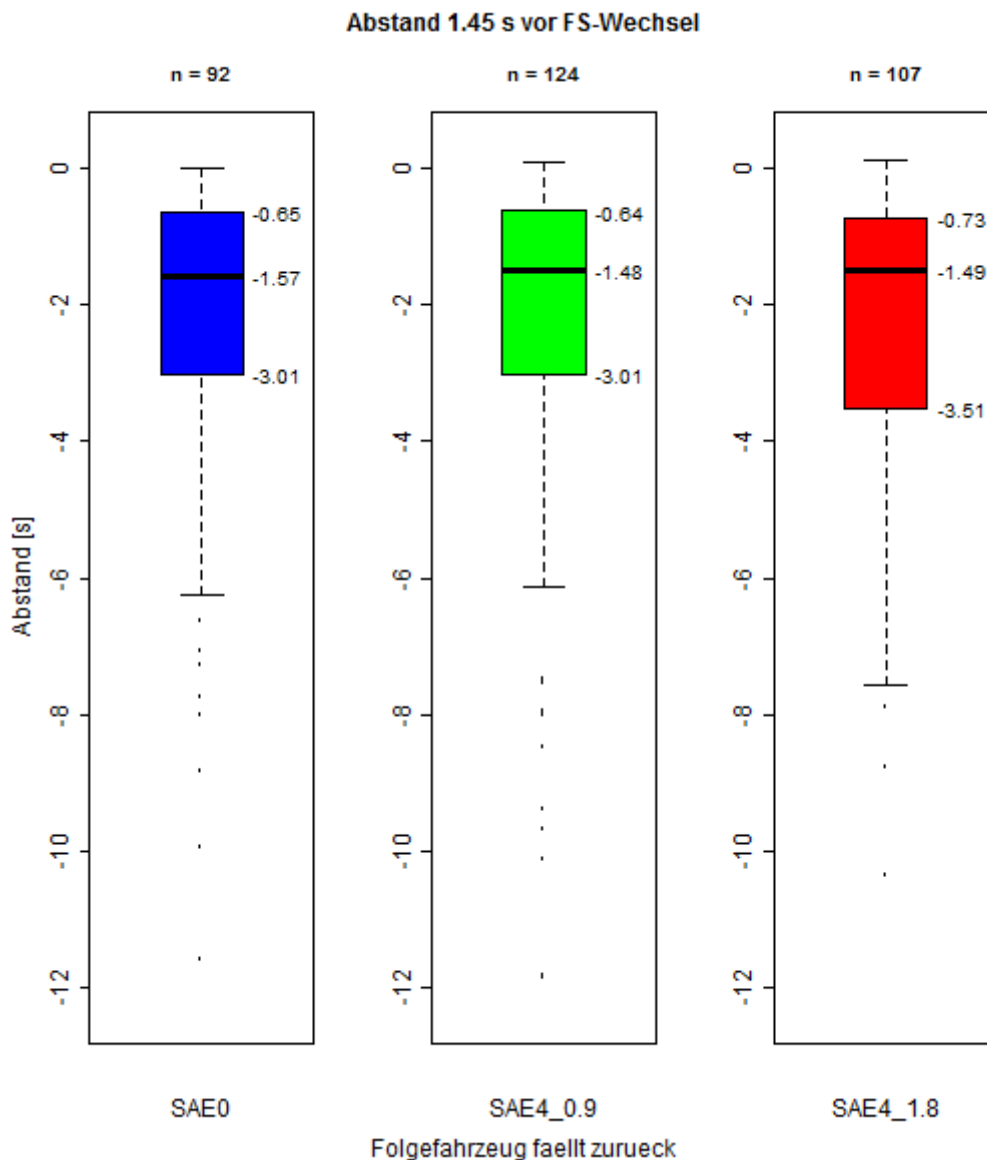
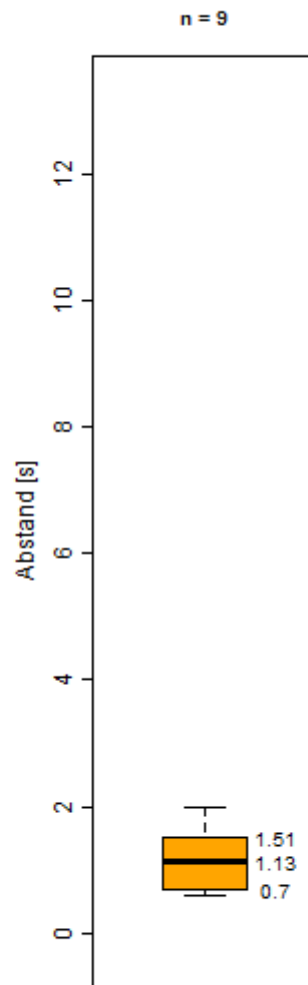


Abbildung 71 Genutzte Zeit-Lücke um einen Fahrstreifenwechsel vor ein langsames Fahrzeug durchzuführen

Da sich keine „Zeit bis zur Kollision“ ergibt, wenn sich die Fahrzeuge voneinander entfernen, wurde für die Fahrstreifenwechselmanöver auf eine Erstellung von Boxplots verzichtet.

Für eine Auswertung der im Fahrstreifenwechselmanöver 3 beschriebenen Fahrsituation, in welcher ein langsames VISSIM-Fahrzeug auf die Fahrstreifen vor das Ego-Fahrzeug wechselte, wurden die Probandenaussagen zu den Fahrstreifenwechseln anderer Fahrzeuge herangezogen. Sofern ein Proband während der Fahrt eine Bemerkung zu einer „knappen Situation“ oder ähnliche Aussagen tätigte, wurden diese im Fragebogen vermerkt und wie unter Unterabschnitt 5.4.3 beschrieben ausgewertet. In Summe fanden sich in den Anmerkungen der Fragebögen nur wenige Aussagen von den Probanden, die sich auf eine dichte Einfädelung eines VISSIM-Fahrzeugs vor dem Ego-Fahrzeug bezogen. Aus diesem Grunde wurden die Anmerkungen aller drei Simulationsszenarien zusammengefasst ausgewertet.

Folgeabstand als VISSIM-Fahrzeug entscheidet: FS-Wechsel



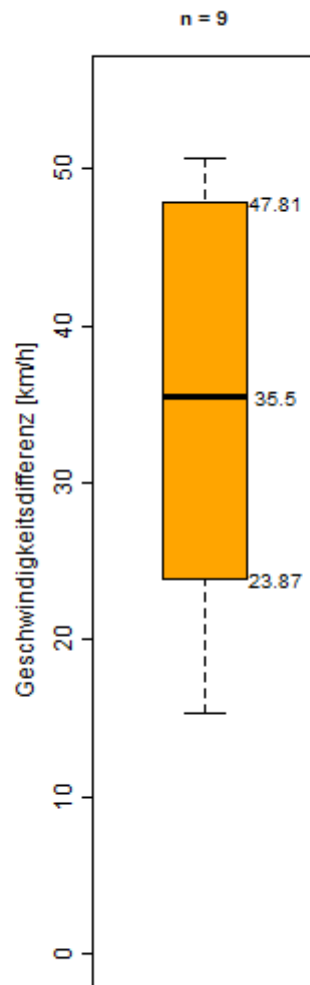
alle Szenarien

Probandenangabe: ueberraschender FS-Wechsel des vorderen VISSIM-Fahrzeugs

Abbildung 72 Zeitabstände zwischen den Fahrzeugen bei denen Probanden angegeben haben, dass ein zu knapper FS-Wechsel durch ein VISSIM-Fahrzeug stattfand

Anders als bei den angenäherten Zeitpunkten an denen die Probanden sich für einen FS-Wechsel entschieden, konnten von den VISSIM-Fahrzeuge die Zeitpunkte über die *drivStates* genauer bestimmt werden. Somit wurden in Abbildung 72 bis Abbildung 76 die Parameter in jenem Zeitschritt ausgewertet, in welchem der Fahrstreifenwechsel beschlossen wurde.

Abbildung 72 zeigt, dass in jeder Situation, in welcher die Probanden angaben von dem FS-Wechsel überrascht worden zu sein, der Sicherheitsabstand 2 Sekunden oder weniger betrug. Die beiden geringsten Sicherheitsabstände, bei denen von VISSIM-Fahrzeugen ein Fahrstreifenwechsel durchgeführt wurde, betragen 0,65 bzw. 0,7 Sekunden. Diese Abstände sind verhältnismäßig kurz, traten jedoch bei Folgefahrten – wie im Abschnitt 6.1 gezeigt – durchaus öfters auf. Wie bei Abbildung 70 beschrieben, spielt die Geschwindigkeitsdifferenz bei der Bewertung eine wesentliche Rolle. Abhängig von den Geschwindigkeitsdifferenzen kann sich für die nachfolgenden Fahrzeuge bei diesen Folgeabständen eine lange oder eine sehr kurze Zeit zur Geschwindigkeitsanpassung ergeben. Aus diesem Grund wurden zunächst die in Abbildung 73 dargestellten Geschwindigkeitsdifferenzen ermittelt.

Geschwindigkeitsdifferenz als VISSIM-Fahrzeug entscheidet: FS-Wechsel

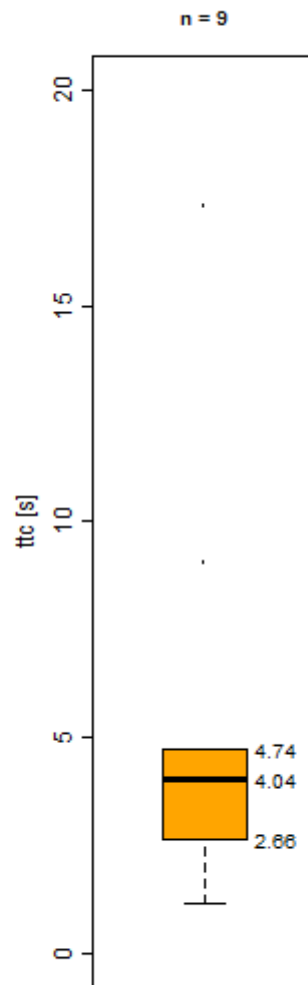
alle Szenarien

Probandenangabe: ueberraschender FS-Wechsel des vorderen VISSIM-Fahrzeugs

Abbildung 73 Geschwindigkeitsdifferenzen zum Zeitpunkt der Entscheidung zu einem FS-Wechsel durch das VISSIM-Fahrzeug

Die in Abbildung 73 gezeigten Geschwindigkeitsdifferenzen weisen mit einem Median von 35,5 km/h noch realistische Unterschiede auf. Da diese Geschwindigkeitsdifferenzen allerdings zu einem Zeitpunkt auftraten, in welchem das auf dem Zielfahrstreifen nachfolgende Fahrzeug einen Sicherheitsabstand von weniger als 2 Sekunden hatte, werden diese Geschwindigkeitsunterschiede als sehr groß angesehen. Ein Viertel der Fahrstreifenwechsel wurden durchgeführt, obwohl die Geschwindigkeitsdifferenz sogar 47,8 km/h oder mehr betrug. Somit ist es nicht verwunderlich, dass die Zeitspannen bis zur Kollision nur sehr gering waren (siehe Abbildung 74).

ttc als VISSIM-Fahrzeug entscheidet: FS-Wechsel



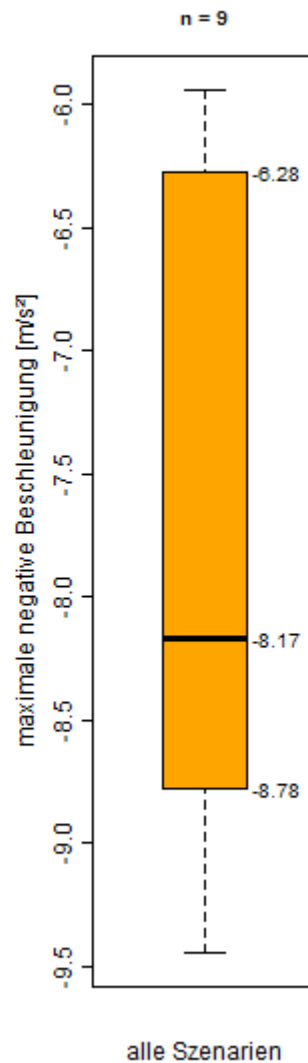
alle Szenarien

Probandenangabe: ueberraschender FS-Wechsel des vorderen VISSIM-Fahrzeugs

Abbildung 74 Zeit bis zur Kollision bei unveränderten Geschwindigkeiten zum Zeitpunkt, als das VISSIM-Fahrzeug einen FS-Wechsel beschlossen hat

In Abbildung 74 finden sich die ttc-Werte zwischen dem Ego-Fahrzeug und dem VISSIM-Fahrzeug, welches sich vor dem Ego-Fahrzeug eingefädelt hat. Verglichen mit Abbildung 70 erkennt man deutlich, dass sich in den von den Probanden genannten Situationen kurze Folgedistanzen (Abbildung 72) kombiniert mit höheren Geschwindigkeitsdifferenzen (Abbildung 73) eingestellt haben. Zwar beschreiben Stanczyk und Jurecky [2014], dass die Reaktionszeit mit abnehmenden ttc-Werten ebenfalls abnimmt, doch geben Fahrstreifenwechsel mit ttc-Werten um 1 Sekunde kaum noch eine ausreichende Zeit, um zu reagieren und eine entsprechende Geschwindigkeitsreduktion vorzunehmen. Abgesehen von dem Ausreißer, welcher rund 9 Sekunden bis zur Kollision aufwies, trat bei alle anderen von den Probanden genannten Situationen ein ttc-Wert kleiner 5 Sekunden ein. Der Median lag bei 4,04 Sekunden, doch in zumindest zwei Situationen betrug die Zeitspanne bis zur Kollision 2,66 Sekunden oder weniger.

Aus diesem Grunde ist es nicht verwunderlich, dass es in der Realität - trotz der in Abbildung 75 gezeigten maximalen Verzögerungen von bis zu rund 9,5 m/s - zu Unfällen gekommen wäre (siehe Abbildung 76).

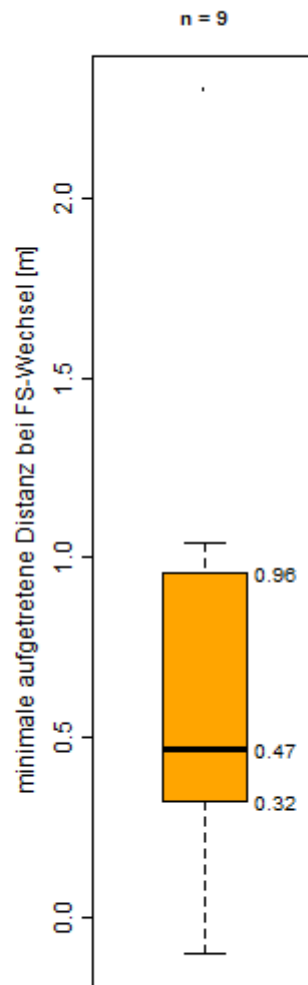
Maximale negative Beschleunigung

Probandenangabe: ueberraschender FS-Wechsel des vorderen VISSIM-Fahrzeugs

Abbildung 75 Maximal aufgetretene Verzögerungen bei überraschenden FS-Wechsel

Abbildung 75 zeigt die aufgetretenen maximalen Verzögerungen im Rahmen der von den Probanden genannten gefährlichen FS-Wechselsituationen. Dabei ist zu erkennen, dass in der Hälfte der genannten Fahrstreifenwechselmanöver eine maximale Verzögerung von 8,17 m/s² auftrat. In rund einem Viertel der Fälle stieg die maximale Verzögerung auf zumindest 8,78 m/s². Die 6,28 m/s² Verzögerung, welche in 25% der Fälle maximal auftrat, können noch als „starke Verzögerung“ gewertet werden. Dennoch trat in zumindest der Hälfte dieser Fahrstreifenwechselmanöver eine absolute Notsituation ein, in welcher eine Vollbremsung eingeleitet wurde.

Minimale Distanz beim FS-Wechsel



alle Szenarien

Probandenangabe: ueberraschender FS-Wechsel des vorderen VISSIM-Fahrzeugs

Abbildung 76 Minimale aufgetretene Distanz zwischen dem Ego-Fahrzeug und dem Fahrzeug welches sich auf dem Fahrstreifen vor dem Ego-Fahrzeug eingefädelt hat

Abbildung 76 zeigt die minimalen Distanzen, welche sich im Zuge des Fahrstreifenwechsels zwischen dem Ego-Fahrzeug und dem VISSIM-Fahrzeug ergeben haben. Die Werte geben an wieviele Meter zwischen den beiden Fahrzeugen mindestens aufgetreten sind. Negative Werte bedeuten, dass das Ego-Fahrzeug nicht mehr rechtzeitig genügend Geschwindigkeit abbauen konnte und es deshalb zu einem Unfall gekommen wäre. In Summe trat bei den neun ausgewerteten Situationen zwei Mal der Fall ein, dass das Ego-Fahrzeug auf das VISSIM-Fahrzeug aufgefahren wäre.

Nicht berücksichtigt wurden bei diesen Auswertungen Aussagen, welche sich bei Situationen unter VISSIM-Fahrzeuge ergaben, die keinen Einfluss auf das Ego-Fahrzeug nahmen. Ebenfalls wurden Situationen, in denen die Probanden auf einen anderen Fahrstreifen auswichen, nicht in diesen Auswertungen berücksichtigt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Für die Untersuchung des menschlichen Fahrverhaltens bei Interaktionen mit automatisierten Fahrzeugen im hochranigen Straßennetz wurde eine Fahrsimulatorstudie durchgeführt. In dieser Studie wurden objektive Messdaten (z.B. Geschwindigkeitsdifferenzen, Abstandsverhalten) aus dem Fahrsimulator, sowie Antworten zum subjektiven Befinden der Probanden durch Befragung mittels Fragebogen gesammelt. Die Probanden sollten hierfür einen ca. 14 km langen dreistreifigen Abschnitt auf einer simulierten Autobahn möglichst realitätsnahe (mit dem gewohnten Fahrverhalten) durchfahren, wobei die durch VISSIM eingespeisten Fahrzeuge unterschiedliche Fahrverhalten aufwiesen. So wurde den VISSIM-Fahrzeugen einmal ein dem menschlichen Verhalten nachempfundenes Fahrverhalten und zweimal ein hochautomatisiertes Fahrverhalten (entsprechend SAE level 4) zugewiesen. Die Fahrverhalten mit automatisierten Fahrfunktionen unterschieden sich nur bei den eingehaltenen Folgeabständen (0,9 Sekunden und 1,8 Sekunden). Abhängig von diesen drei Szenarien wurde das Fahrverhalten der Probanden, unterteilt in ein Folgeverhalten und ein Fahrstreifenwechselverhalten, analysiert und auf Veränderungen abhängig vom Fahrverhalten der VISSIM-Fahrzeuge untersucht.

Um möglichst viele Interaktionen bezüglich Aus- bzw. Einfädelungen der VISSIM-Fahrzeuge zu erhalten, wurde entlang der fünf Knotenpunkte im simulierten Netz eine hohe Anzahl an zu- und abfließenden Fahrzeugen (ca. 30% der Verkehrsstärke vor bzw. nach den Knoten) angesetzt. Die Verflechtungen dieser aus- bzw. einfädelnden Fahrzeuge führten vor allem auf dem rechten FS vor den Knotenpunkten bei hohen Verkehrsstärken zu einem zähfließenden Verkehr. Um ein zu starkes Absinken der Reisegeschwindigkeit zu vermeiden, wurde die eingespeiste Verkehrsstärke auf der HFB auf rund 50% der Kapazität abgesenkt. Durch die reduzierte Verkehrsstärke ergaben sich jedoch wiederum weniger Situationen, in denen die Probanden mit den VISSIM-Fahrzeugen interagierten. Aus diesem Grunde wurden die Fahrverhalten aller Probanden in einem Szenario gemeinsam ausgewertet und die Ergebnisse der einzelnen Szenarien miteinander verglichen.

Bei dem Fragebogen zum subjektiven Befinden wurden Fragen zum Abstandsverhalten und der Fahrdynamik der VISSIM-Fahrzeuge abgefragt. Bei den Antworten sollte ebenfalls danach unterschieden werden, ob sie sich auf Fahrstreifenwechsel oder Folgefahrten beziehen. Zusätzlich gab es noch eine Frage zum generellen Fahrkomfort bezogen auf das jeweilige Simulationsszenario. Anhand dieser wurde festgestellt, dass die Probanden generell jenes Szenario präferierten, in dem die VISSIM-Fahrzeuge ein Fahrverhalten ohne automatisierte Fahrfunktionen aufwiesen. Die größten Kritikpunkte wurden dem Szenario SAE4 mit einem Folgeabstand von 1,8 Sekunden in Bezug auf das Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsverhalten gegeben. Dabei wurde das dynamische Fahrverhalten sowohl bei Folgefahrten als auch beim Aus- und Einfädeln in den Verkehrsfluss (Fahrstreifenwechsel) als „eher unangenehm“ beurteilt. Die Bewertung des Fahrkomforts im Allgemeinen wurde bei allen drei Szenarien positiv bewertet. Unter Umständen zeichnet sich bei einer Erhöhung der generellen Verkehrsstärke eine deutlichere Unterscheidung im Fahrkomfort ab.

Bei der Analyse der Folgeabstände zeigte sich, dass die Probanden in den untersuchten Situationen mit einem Fahrverhalten der VISSIM-Fahrzeuge entsprechend SAE level 0 einen Folgeabstand von ca. 1,2 Sekunden (Median) einhielten. In den Szenarien mit automatisierten Fahrverhalten der VISSIM-Fahrzeuge sank der Median auf rund 1,0 Sekunden ab. Aufgrund der geringen Anzahl an Stichproben kann man jedoch nicht von einer Veränderung des Fahrverhaltens ausgehen. Verglichen mit den von Wagner [2016] präsentierten Daten (rund 1,1 Sekunden Folgeabstand bei Geschwindigkeiten von ca. 100 km/h), ergeben sich nur geringe Abweichungen, wodurch eher davon

ausgegangen werden kann, dass sich das Fahrverhalten der Probanden durch die Fahrzeuge mit aF nicht geändert hat. Betrachtet man die Fahrverhalten aller drei Szenarien gemeinsam, ergibt sich für das Folgefahrverhalten der Probanden ein Folgeabstand zwischen 0,8 Sekunden (25% Quartile) und 1,4 Sekunden (75% Quartile) mit einem Median bei 1,1 Sekunden.

Bei der Auswertung des Fahrstreifenwechselverhaltens wurde unterschieden, ob sich die Probanden vor einem schneller fahrenden Fahrzeug oder vor einem langsamer fahrenden Fahrzeug einordneten. Hierbei wurden die Zeitabstände zu den hinteren Fahrzeugen des Zielfahrstreifens untersucht. Bei einem Wechsel vor ein Fahrzeug, welches eine langsamere Geschwindigkeit als das Ego-Fahrzeug besaß, konnten keine Unterschiede im Wechselverhalten der Probanden abhängig von dem Automatisierungsgrad der VISSIM-Fahrzeuge festgestellt werden. Eine andere Situation ergab sich auf den ersten Blick bei Fahrstreifenwechseln vor Fahrzeuge mit einer höheren Geschwindigkeit als jene des Ego-Fahrzeugs. Dabei stieg der Median der akzeptierten Zeitabstände bei einem Fahrstreifenwechsel auf nahezu den doppelten Wert, wenn man die ausgewerteten FS-Wechsel von Szenario SAE0 mit Szenario SAE4_0.9 vergleicht. Ebenfalls konnte bei einem Vergleich der Szenarien SAE0 und SAE4_1.8 eine leichte Erhöhung bei den akzeptierten Zeitabständen festgestellt werden. Bei einer Berücksichtigung der Differenzgeschwindigkeiten zwischen dem Ego-Fahrzeug und dem entsprechenden VISSIM-Fahrzeug bestätigte sich diese Abweichung jedoch nicht. Untersucht man die akzeptierten „Zeiten bis zur Kollision“ im angenäherten Zeitpunkt des Entschlusses zu einem Fahrstreifenwechsel, so kann man keine Unterschiede in den Verteilungen auf Grund der den VISSIM-Fahrzeugen zugewiesenen Fahrverhalten feststellen.

Ergänzend wurden die von den Probanden genannten Situationen untersucht, in denen ein VISSIM-Fahrzeug einen überraschenden oder gefährlichen Fahrstreifenwechsel durchgeführt hatte. Dabei wurde festgestellt, dass die Folgezeitabstände zwischen den Fahrzeugen stets kleiner als 2 Sekunden waren. Ausschlaggebend dürften jedoch abermals die geringen ttc-Werte zum Zeitpunkt der Entscheidung zum FS-Wechsel gewesen sein. Mit lediglich rund 4 Sekunden (Median) Zeit bis zur Kollision mussten die Probanden starke Verzögerungen einleiten, um einen Unfall vermeiden zu können. Der geringste ttc-Wert, welcher von einem VISSIM-Fahrzeug für einen FS-Wechsel akzeptiert wurde, lag bei rund 1,1 Sekunden. Da dieser Wert für Menschen oftmals eine zu kurze Zeitspanne darstellt, um die erforderliche Geschwindigkeitsreduktion durchzuführen, ist es sehr wahrscheinlich, dass es bei diesen FS-Wechseln in der Realität zu einem Unfall gekommen wäre.

Es kann somit festgehalten werden, dass die Probanden das Szenario, in dem die VISSIM-Fahrzeuge ein Fahrverhalten entsprechend SAE level 0 aufwiesen, - womöglich aus Gewohnheit - präferierten. In den qualitativen Auswertungen der fahrdynamischen Kenngrößen wurde im Szenario SAE0 das durchschnittlich geringste Beschleunigungsrauschen innerhalb der untersuchten Szenarien festgestellt. Somit fand in diesem Szenario im Durchschnitt die gleichmäßigste Fahrt der drei verglichenen Szenarien statt. Da in den Analysen der einzelnen Folge- und FS-Wechselverhalten jedoch nur geringe Abweichungen festgestellt wurden, wird davon ausgegangen, dass bei den untersuchten Verkehrsstärken keine markanten Änderungen im Fahrverhalten - aufgrund von Interaktionen mit automatisierten Fahrzeugen - auftreten.

Für zukünftige Untersuchungen bietet sich eine Erhöhung der Verkehrsstärken (Auslastungsgrad) auf der Hauptfahrbahn an. Dabei können die Verhältnisse an zu- und abfließenden Fahrzeuge an den Knotenpunkten reduziert werden, um einen stabileren Verkehrsfluss auf der HFB zu erhalten. Optional kann auch an eine Erhöhung der Verkehrsstärken auf Werte über den derzeitigen Richtwert der Kapazität, speziell in Szenarien mit einem hohen Anteil an automatisierten Fahrzeugen, gedacht werden. Ebenfalls kann die Anzahl an Pkws mit hohen Wunschgeschwindigkeiten erhöht werden.

Zusätzlich ist aufgefallen, dass die VISSIM-Fahrzeuge bei einer Steuerung über die Schnittstelle für externes Fahrverhalten (hier in den Szenarien mit hochautomatisierten Fahrverhalten) in manchen Situationen kürzere Folgeabstände eingehalten haben, als angedacht wurde (siehe Anhang – Unterabschnitt 10.6.2). Bei einer etwaigen Weiterverwendung dieser DLLs bleibt noch festzustellen, wie diese gelegentlichen Abweichungen zustande gekommen sind. Im Rahmen dieser Masterarbeit konnte keine Begründung für diese Unregelmäßigkeiten gefunden werden.

Um genauere Daten bezüglich der Zeitpunkte aufkommender Wechselwünsche zu erhalten, könnte in zukünftigen Studien mit dem Fahrsimulator eine Regelung in Betracht gezogen werden, bei welcher die Probanden beispielsweise über das Betätigen des Blinkers symbolisieren, wann ein Wechselwunsch auftritt. Dabei sollte die Betätigung allerdings bereits beim Aufkommen eines Wechselwunsches erfolgen und nicht – wie im realen Verkehr üblich – erst nach der Überprüfung der Durchführbarkeit eines FS-Wechsels.

Für erneute Probandenstudien, bei denen der FASI des Instituts für Fahrzeugtechnik zum Einsatz kommt, sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Dem Ego-Fahrzeug im VISSIM-Modell sollte der Fahrzeugtyp mit der Nummer „100“ zugewiesen werden. Bei einem Start der Simulation springt der Fahrzeugtyp des Ego-Fahrzeugs automatisch auf 100, wodurch es vorkam, dass eine Zuweisung des Ego-Fahrzeugs zu dem entsprechenden Fahrzeugtyp während der Probandenstudie verabsäumt wurde. Eine Zuordnung der Fahrzeug-ID war in diesen Fällen über eine manuelle Analyse der Fahrzeuggeschwindigkeiten zu Beginn der Simulationen möglich.
- Die Bremslichter der VISSIM-Fahrzeuge während der Simulation sollten deutlicher zum Vorschein kommen. Diese wurden häufig übersehen, wodurch die Probanden oftmals eine falsche Einschätzung der Geschwindigkeiten während der Simulation erwähnten bzw. von einer Geschwindigkeitsänderung „überrascht“ wurden.
- Die von VISSIM ausgegebenen Blinkersignale sollten unbedingt in der Visualisierung im FASI ersichtlich sein. Eine der häufigsten Anmerkungen der Probanden im Gespräch nach der Simulatorstudie war, dass sie von einem plötzlichen Fahrstreifenwechsel der VISSIM-Fahrzeuge überrascht wurden. Dabei erwähnten einige Probanden, dass sie in manchen Situationen eventuell anders reagiert hätten, wenn sie ein Blinkersignal vor dem FS-Wechsel des VISSIM-Fahrzeuges gesehen hätten.
- In der Visualisierung des VISSIM-Modelles wurden im Fahrsimulator nicht alle VISSIM-Fahrzeugen kontinuierlich dargestellt. Fahrzeuge, welche sich nicht in unmittelbarer Nähe zum Ego-Fahrzeug befanden, wurden oftmals ausgeblendet. Bei einer Annäherung passierte es daher zeitweise, dass Fahrzeuge vor (oder hinter) dem Ego-Fahrzeug aus dem Nichts auftauchten oder verschwanden. Darauf sollten die Probanden vor Beginn der Simulationen bereits hingewiesen werden.

Für die skriptbasierte Auswertung des Folgeverhaltens kann über eine Adaption der Filterkriterien eine verbesserte Auswahl der interessanten Folgesituationen erreicht werden. Beispielsweise könnte über eine Zählung der 0 km/h Differenzgeschwindigkeitsdurchschreitungen bei den Wechsels zwischen Annäherung und Abstandsaufbau eine erste Filterung erfolgen.

Abschließend bleibt zu sagen, dass in dieser Studie das Fahrverhalten entsprechend SAE level 0 im subjektiven Befinden der Probanden – möglicherweise aus Gewohnheit – am Besten abgeschnitten hat. Zwischen den unterschiedlichen Simulationsszenarien konnten jedoch keine wesentlichen Änderungen im Fahrverhalten der Probanden festgestellt werden.

8 Glossar

Bestimmtheitsmaß	Ist ein Maß für die Anpassungsgüte einer Trendlinie (Regressionsgeraden) an einen Datensatz. Die Werte liegen zwischen 0 und 1, wobei ein Wert von 1 (100%) besagt, dass alle Werte auf der Geraden liegen und durch diese beschrieben werden.
data frame	Ein „data frame“ in <i>R</i> kann, wie auch eine Matrix, eine ein- oder zweidimensionale Ausbreitung besitzen. Im Gegensatz zu einer Matrix können die Spalten bei <i>data frames</i> unterschiedliche Modi (z.B. numeric, character oder factor etc.) aufweisen.
DLL	Steuerungsdatei (*.dll); kann Code und Daten enthalten
Ego-Fahrzeug	Jenes virtuelle Fahrzeug innerhalb der Simulation, welches durch einen Probanden über den Fahrsimulator als Peripheriegerät gesteuert wird
Fahrdynamik	„Die Fahrdynamik beschreibt alle Bewegungen des Fahrzeugs [...] sowie die auf das Fahrzeug einwirkenden Kräfte und Momente in und um die drei Fahrzeugbewegungsrichtungen.“ Heißing et al. [2011]
FASI (Fahrsimulator)	Ein Gerät, welches dem Benutzer die gleichen akustischen, visuellen und zum Teil haptischen Eindrücke vermittelt, welche beim Fahren eines Kraftfahrzeugs wahrgenommen werden können.
*.fzp	ist eine Ausgabedatei von VISSIM, welche zuvor definierte Fahrzeugparameter in den eingestellten Aufzeichnungsintervallen mitprotokolliert.
Interquartilsabstand	ist ein Streuungsmaß, welches nur wenig von Ausreißern beeinflusst wird. Es wird ermittelt, indem man vom Wert der 75% Quartile den Wert der 25% Quartile abzieht.
Kapazität	„Die Kapazität ist die größte Verkehrsstärke, die ein Verkehrsstrom [...] in einem Zeitintervall an einem Querschnitt erreichen kann.“ [FGSV, 2015]
Kilometrierung	eine fortlaufende Meter- bzw. Kilometerzählung entlang einer Straßenachse
Median	gibt jenen Wert einer Stichprobe wieder, bei dem rund 50% der Werte kleiner und rund 50% der Werte größer sind.
Nettoabstand	Lichter Fahrzeugabstand (gemessen von der hinteren Stoßstange des vorausfahrenden Fahrzeugs zur vorderen Stoßstange des nachfolgenden Fahrzeugs).
Nettozeitabstand	Jene Zeit, die zwischen dem Verlassen eines Messpunktes (z.B. Detektor) durch ein vorausfahrendes Fahrzeug und das erneute Erreichen durch ein nachfolgendes Fahrzeug verstreicht.
Package	Ein „Package“ bündelt Codes, Daten und Tests, wodurch diese leichter mit anderen Personen geteilt werden können.
Quantile	ist eine Kennzahl einer Stichprobe. Bei der Quantile liegt ein definierter Anteil der Werte unter dem Quantilwert, der Rest der Werte liegt darüber. Eine spezielle Form der Quantile stellen die 25%-Quantil, die 50%-Quantile (auch Median genannt) und die 75%-Quantile dar.

Quartile	eine Quartile unterteilt der Größe nach geordnete Stichprobenwerte in vier Teile. Dabei gibt die 25%-Quartile jenen Wert wieder, bei dem 24,99% der Werte kleiner sind. Rund 75% der Werte sind somit größer als die 25%-Quartile. Die 75%-Quartile gibt jenen Wert wieder bei dem 74,99% der Werte kleiner sind und umgekehrt rund 25% der Werte größer.
Semikolon	Auch „Strichpunkt“ genannt
Simulationsschritt	Die Zeitspanne zwischen den einzelnen Simulationssekunden, in welcher keine erneute Berechnung der Fahrzeugeigenschaften erfolgt.
Simulationssekunde	Ein Zeitpunkt innerhalb einer Simulation. Dabei werden für alle Fahrzeuge, welche sich zu diesem Zeitpunkt in der Simulation befinden, die gesamten Eigenschaften (z.B. aktuelle Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung, FS-Wechsel-Wunsch etc.) berechnet.
stromabwärts	Bei einem (Verkehrs-) Fluss: in Strömungsrichtung
stromaufwärts	Bei einem (Verkehrs-) Fluss: entgegen der Strömungsrichtung
Trajektorie	Die Aufzeichnung einer Bewegung in einem Weg-Zeit-Diagramm
ttc (time to collision)	Fährt ein Fahrzeug mit einer höheren Geschwindigkeit als dessen Vorderfahrzeug auf demselben Fahrstreifen, so kommt es bei ungeänderten Geschwindigkeiten in absehbarer Zeit zu einer Kollision. Diese Zeitspanne wird „time to collision“ (kurz ttc) genannt.
Verbindungsstrecke	Eine Verbindungsstrecke schafft in VISSIM einen Übergang zwischen zwei Strecken.
Verkehrsdichte (k)	Die Verkehrsdichte beschreibt wieviele Fahrzeuge sich auf einer Strecke mit definierter Länge befinden und wird als eine Momentaufnahme erhoben. Einheit z.B. [Kfz / km]
Verkehrsstärke (q)	Die Verkehrsstärke beschreibt, wieviele Fahrzeuge einen Querschnitt in einer definierten Zeit überschreiten. Einheit z.B. [Kfz / h]
VISSIM-Fahrzeuge	Virtuelle Fahrzeuge welche durch das Verkehrsflusssimulationsprogramm VISSIM erstellt wurden und deren Fahrverhalten primär über Folgemodelle und Fahrstreifenwechselmodelle gesteuert werden

9 Literaturverzeichnis

Asch, S. (1946): *Forming Impressions of Personality*, In: *The Journal of Abnormal and Social Psychology*, Band 41 Ausgabe 3, S.258-290

ASFINAG 2017, Verfügbar unter: <https://www.asfinag.at/verkehr/verkehrszaehlung/>, [Datum des Zugriffs: 23.03.2017]

bmvit-infothek, Verfügbar unter: <https://infothek.bmvit.gv.at/autonome-autos-vom-fahrer-zum-passagier/>, [Datum des Zugriffs: 06.03.2018]

Boll, M-T. (2011): *Ein neues Konzept zur automatisierten Bewertung von Fertigkeiten in minimal invasiven Chirurgie für Virtual-Reality-Simulatoren in Grid-Umgebungen*, KIT Scientific Publishing

Breuer, B.; Bill, K. (2017): *Bremsenhandbuch - Grundlagen, Komponenten, Systeme, Fahrdynamik*, Springer-Verlag

Bundesgesetz vom 6. Juli 1960, mit dem Vorschriften über die Straßenpolizei erlassen werden (Straßenverkehrsordnung 1960 - StVO) BGBl 159/1960 idF I Nr 68/2017

Busch, F.; Krause, S.; Motamedidehkordi, N.; Hoffmann, S.; Vortisch, P.; Hartmann, M. (2017): *Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur*, In: FAT - Schriftenreihe 296 (2017), S.1-154

Dallmeyer, J. (2014): *Simulation des Straßenverkehrs in der Großstadt*, Springer-Verlag

driverless-future, Verfügbar unter: http://www.driverless-future.com/?page_id=384, [Datum des Zugriffs: 03.01.2018]

Erlemann, K. (2007): *Objektorientierte mikroskopische Verkehrsflusssimulation*, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation

Fellendorf, M.; Friedrich, M. (2001): *Kopplung makroskopischer und mikroskopischer Verkehrsmodelle - ein Verfahren für die Integration von großräumiger Planung und Detailplanung*, In: Tagungsband der 18. Verkehrswissenschaftlichen Tage

Fellendorf, M.; Haberl, M.; Kerschbaumer, A.; Medicus, E.; Neuhold, R.; Rudigier, M. (2017): *Bewertung des Verkehrsgeschehens durch automatisiertes Fahren auf Autobahnen und Schnellstraßen VEGAS*, Forschungsbericht

Fellendorf, M.; Vortisch, P. (2010): *Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM*, In: Fundamentals of Traffic Simulations (2010), S.63-93

FGSV (2015): *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS)*, FGSV 299 A, Ausgabe: 2015, FGSV Verlag

Friedrich, B. (2015): *Verkehrliche Wirkung autonomer Fahrzeuge*, In: Autonomes Fahren (2015), S.331-350

Gazis, D.; Herman, R.; Rothery, R. (1961): *Nonlinear Follow the Leader Models of Traffic Flow*, In: Operational Research 9 (4), S.545-567

Geistefeldt, J.; Giuliani, S.; Busch, F.; Schendzielorz, T.; Haug, A.; Vortisch, P.; Leyn, U.; Trapp, R. (2015): *HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen*, Forschungsbericht

Greitemeyer, T. (2012): *Sozialpsychologie*, Kohlhammer Verlag

Hammer, D. (2015): *Entwicklung einer Softwareumgebung für einen Fahr Simulator*, TU Graz, Diplomarbeit

Heissing, B.; Ersoy, M.; Gies, S. (2011): *Fahrwerkhandbuch - Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven*, 3. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden

Hoefs, D. (1972): *Untersuchung des Fahrverhaltens in Fahrzeugkolonnen*, In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 140

Johnson, D. (2005): *Introduction to and Review of Simulator Sickness Research*, Forschungsbericht

Kölbl, R.; Fellendorf, M.; Neuhold, R.; Gerstenberger, M.; Geßenhardt, J.; Krampe, S.; Pfister, J. (2015): *Indikatoren zur multikriteriellen Analyse kooperativer Transportsysteme (IMPAKT)*, Forschungsbericht

Krause, S.; Motamedidehkordi, N.; Hoffmann, S.; Busch, F. (2017): *Mikroskopische Simulation von teil- und hochautomatisierten Fahrzeugen zur Ermittlung der Wirkungen auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur*, In: HEUREKA '17, 2017

Lange, M.; Eichberger, A.; Chaloupka-Risser, C.; Kaufmann, C.; Haupt, J.; Sumper, E.; Fördös, A. (2017): *Regelwerk zur Gestaltung der Beschilderung und Infrastruktur zur schnelleren, reibungsfreien Abwicklung an Mautstellen - RENNT*, Forschungsbericht

PTV VISSIM 8 - Benutzerhandbuch, 2016

Pumberger, A.; Fessl, T.; Authried, M. (2011): *Lkw-Geschwindigkeitsverhalten auf Autobahnen - Erhebung und Analyse der Lkw-Geschwindigkeiten auf ausgewählten Streckenabschnitten österreichischer Autobahnen*

Richtlinien und Vorschriften für das Straßenverkehrswesen (2001): *RVS 03.05.13 - Gemischte und Planfreie Knoten*

Richtlinien und Vorschriften für das Straßenverkehrswesen (2012): *RVS 03.01.11 - Beurteilung des Verkehrsablaufs auf Straßen*

SAE International (2014): *J3016 - Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems*

Schinko, C.; Peer, M.; Hammer, D.; Pirstinger, M.; Lex, C.; Koglbauer, I.; Eichberger, A.; Holzinger, J.; Eggeling, E.; Fellner, D.; Ullrich, T. (2016): *Building a Driving Simulator with Parallax Barrier Displays*, In: *11th Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP 2016) - Volume 1: GRAPP*, S.283-291

Schmidt, A. (2016): *Modellierung von Fahrzeugantrieben anhand von Messdaten aus dem Koppelantrieb zwischen Fahr Simulator und Antriebsstrangprüfstand*, Springer Verlag

Sparmann, U. (1978): *Spurwechselforgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen*, In: *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Ausgabe 263

Sukennik, P.; Lohmiller, J.; Schlaich, J. (2017): *Mikrosimulation von Autonomen Fahrzeugen*, In: *HEUREKA '17*, 2017

Trapp,R.; Arbter, B.; Baier, M.; Baumert, R.; Breser, C.; Harding, J.; Heinig, K.; Hoyer, R.; Klod, M.; Matschke, I.;Schuckließ, W.;Vieten, M.; Vortisch, P.; Wagner, P. (2006): *Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation - Grundlagen und Anwendung*, In: *Forschungsgesellschaft Für Strassen- und Verkehrswesen - Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit*, FGSV 388, Ausgabe: 2006, FGSV Verlag

Treiber, M.; Kesting, A. (2010): *Verkehrsdynamik und -simulation - Daten, Modelle und Anwendung der Verkehrsflusssimulation*, Springer Verlag

Wagner, P. (2016): *Autonomer Verkehr und die Kapazität von Straßen*, Bei: 12. Sommerakademie der TU Graz (ISV) am 08.09.2016

Werner, C. (2010): *Integration von Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselmodellen in die Nachtfahrsimulation LucidDrive*, Universität Paderborn, Diplomarbeit

Wiedemann, R. (1974): *Simulation des Straßenverkehrsflusses*

10 Anhang

10.1 Folge- und Fahrstreifenwechselformparameter für VISSIM

10.1.1 PKW im Szenario SAE 0

Folgeverhalten	PKW-HFB	PKW-Einfahrt-E1	PKW-Verflechtung-V1	PKW-Ausfahrt-A1
Vorausschauweite				
min	0,00 m	0,00 m	0,00 m	0,00 m
max	250,00 m	250,00 m	250,00 m	250,00 m
Vorderfahrzeuge	2	2	4	2
Zurückschauweite				
min	0,00 m	0,00 m	0,00 m	0,00 m
max	150,00 m	150,00 m	150,00 m	150,00 m
Fahrzeugfolgemodell	Wiedemann 99	Wiedemann 99	Wiedemann 99	Wiedemann 99
Modellparameter				
CC0	1,50 m	2,50 m	3,00 m	2,50 m
CC1	1,05 s	1,25 s	1,65 s	1,15 s
CC2	4,00 m	4,00 m	4,00 m	5,00 m
CC3	- 8,00	- 8,00	- 8,00	- 8,00
CC4	- 0,30	- 0,35	- 0,35	- 0,35
CC5	0,35	0,35	0,35	0,35
CC6	11,44	11,44	11,44	11,44
CC7	0,25 m/s ²	0,25 m/s ²	0,25 m/s ²	0,25 m/s ²
CC8	3,50 m/s ²	3,50 m/s ²	3,50 m/s ²	3,50 m/s ²
CC9	1,50 m/s ²	1,50 m/s ²	1,50 m/s ²	1,50 m/s ²
Fahrstreifenwechsel	PKW-HFB	PKW-Einfahrt-E1	PKW-Verflechtung-V1	PKW-Ausfahrt-A1
Grundverhalten	Rechtsfahrgebot	Freie Fahrstreifenwahl	Freie Fahrstreifenwahl	Freie Fahrstreifenwahl
Notwendiger Fahrstreifenwechsel				
Maximale Verzögerung (eigene)	- 4,00 m/s ²	- 4,00 m/s ²	- 4,00 m/s ²	- 4,00 m/s ²
- 1 m/s ² pro Entfernung (eigene)	300,00 m	300,00 m	400,00 m	200,00 m
Akzeptierte Verzögerung (eigene)	- 1,00 m/s ²	- 1,50 m/s ²	- 1,50 m/s ²	- 1,00 m/s ²
Maximale Verzögerung (Folgefahrzeug)	- 3,00 m/s ²	- 3,00 m/s ²	- 4,00 m/s ²	- 3,00 m/s ²
-1 m/s ² pro Entfernung (Folgefahrzeug)	200,00 m	200,00 m	400,00 m	200,00 m
Akzeptierte Verzögerung (Folgefahrzeug)	- 0,75 m/s ²	- 1,00 m/s ²	- 1,50 m/s ²	- 1,00 m/s ²
Wartezeit bis zur Diffusion	60,00 s	60,00 s	60,00 s	60,00 s
Min. Nettoweglücke	0,50 m	0,50 m	0,50 m	0,50 m
Auf langsameren FS wenn Kollisionszeit mind.	15,00 s			
Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand	0,60	0,80	0,30	0,85
Maximalverzögerung für kooperatives Bremsen	- 3,00 m/s ²	- 6,00 m/s ²	- 9,00 m/s ²	- 9,00 m/s ²
Langsamfahrbereiche überholen	Nein	Nein	Nein	Nein
Intelligentes Einfädeln	Ja	Ja	Ja	Ja
Nach Routenentscheidung stromabwärts suchen	Nein	Nein	Nein	Nein
Kooperativer Fahrstreifenwechsel	Ja	Ja	Ja	Ja
Max. Geschw.-Differenz	10,80 km/h	10,80 km/h	10,80 km/h	10,80 km/h
Max. Kollisionszeit	10,00 s	10,00 s	10,00 s	10,00 s

10.1.2 LKW im Szenario SAE 0

Folgeverhalten	LKW-HFB		LKW-Einfahrt-E1		LKW-Verflechtung-V1		LKW-Ausfahrt-A1	
Vorausschauweite								
min	0,00	m	0,00	m	0,00	m	0,00	m
max	250,00	m	250,00	m	250,00	m	250,00	m
Vorderfahrzeuge	2		2		4		2	
Zurückschauweite								
min	0,00	m	0,00	m	0,00	m	0,00	m
max	150,00	m	150,00	m	150,00	m	150,00	m
Fahrzeugfolgemodell	Wiedemann 99		Wiedemann 99		Wiedemann 99		Wiedemann 99	
Modellparameter								
CC0	1,50	m	2,50	m	3,00	m	2,50	m
CC1	1,05	s	1,25	s	1,65	s	1,15	s
CC2	4,00	m	4,00	m	4,00	m	5,00	m
CC3	- 8,00		- 8,00		- 8,00		- 8,00	
CC4	- 0,30		- 0,35		- 0,35		- 0,35	
CC5	0,35		0,35		0,35		0,35	
CC6	11,44		11,44		11,44		11,44	
CC7	0,25	m/s ²	0,25	m/s ²	0,25	m/s ²	0,25	m/s ²
CC8	2,50	m/s ²	2,50	m/s ²	2,50	m/s ²	2,50	m/s ²
CC9	1,00	m/s ²	1,50	m/s ²	1,00	m/s ²	1,00	m/s ²
Fahrstreifenwechsel	LKW-HFB		LKW-Einfahrt-E1		LKW-Verflechtung-V1		LKW-Ausfahrt-A1	
Grundverhalten	Rechtsfahrgebot		Rechtsfahrgebot		Rechtsfahrgebot		Rechtsfahrgebot	
Notwendiger Fahrstreifenwechsel								
Maximale Verzögerung (eigene)	- 4,00	m/s ²	- 4,00	m/s ²	- 4,00	m/s ²	- 4,00	m/s ²
- 1 m/s ² pro Entfernung (eigene)	200,00	m	200,00	m	400,00	m	200,00	m
Akzeptierte Verzögerung (eigene)	- 1,00	m/s ²	- 1,00	m/s ²	- 1,50	m/s ²	- 1,00	m/s ²
Maximale Verzögerung (Folgefahrzeug)	- 3,00	m/s ²	- 3,00	m/s ²	- 4,00	m/s ²	- 3,00	m/s ²
-1 m/s ² pro Entfernung (Folgefahrzeug)	200,00	m	200,00	m	400,00	m	200,00	m
Akzeptierte Verzögerung (Folgefahrzeug)	- 0,50	m/s ²	- 0,50	m/s ²	- 1,50	m/s ²	- 1,00	m/s ²
Wartezeit bis zur Diffusion	60,00	s	60,00	s	60,00	s	60,00	s
Min. Nettoweglücke	0,50	m	0,50	m	0,50	m	0,50	m
Auf langsameren FS wenn Kollisionszeit mind.	1,00	s	1,00	s	1,00	s	1,00	s
Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand	0,60		0,80		0,30		0,85	
Maximalverzögerung für kooperatives Bremsen	- 3,00	m/s ²	- 6,00	m/s ²	- 9,00	m/s ²	- 9,00	m/s ²
Langsamfahrbereiche überholen	Nein		Nein		Nein		Nein	
Intelligentes Einfädeln	Nein		Ja		Ja		Ja	
Nach Routenentscheidung stromabwärts suchen	Nein		Nein		Nein		Nein	
Kooperativer Fahrstreifenwechsel	Nein		Nein		Ja		Ja	
Max. Geschw.-Differenz					10,80	km/h	10,80	km/h
Max. Kollisionszeit					10,00	s	10,00	s

10.1.3 PKW im Szenario SAE 4 mit 0,9 Sekunden Sicherheitsabstand

Folgeverhalten	PKW-HFB	PKW-Einfahrt-E1	PKW-Verflechtung-V1	PKW-Ausfahrt-A1
Vorausschauweite				
min	0,00 m	0,00 m	0,00 m	0,00 m
max	500,00 m	500,00 m	500,00 m	500,00 m
Vorderfahrzeuge	4	4	4	4
Zurückschauweite				
min	0,00 m	0,00 m	0,00 m	0,00 m
max	150,00 m	150,00 m	150,00 m	150,00 m
Fahrzeugfolgemodell	Wiedemann 99	Wiedemann 99	Wiedemann 99	Wiedemann 99
Modellparameter				
CC0	1,50 m	1,50 m	1,50 m	1,50 m
CC1	0,90 s	0,90 s	0,90 s	0,90 s
CC2	1,00 m	1,00 m	1,00 m	1,00 m
CC3	- 12,00	- 12,00	- 12,00	- 12,00
CC4	- 0,30	- 0,35	- 0,35	- 0,35
CC5	0,35	0,35	0,35	0,35
CC6	11,44	11,44	11,44	11,44
CC7	0,25 m/s ²	0,25 m/s ²	0,25 m/s ²	0,25 m/s ²
CC8	3,50 m/s ²	3,50 m/s ²	3,50 m/s ²	3,50 m/s ²
CC9	1,50 m/s ²	1,50 m/s ²	1,50 m/s ²	1,50 m/s ²
Fahrstreifenwechsel	PKW-HFB	PKW-Einfahrt-E1	PKW-Verflechtung-V1	PKW-Ausfahrt-A1
Grundverhalten	Rechtsfahrgebot	Rechtsfahrgebot	Rechtsfahrgebot	Rechtsfahrgebot
Notwendiger Fahrstreifenwechsel				
Maximale Verzögerung (eigene)	- 4,00 m/s ²	- 4,00 m/s ²	- 4,00 m/s ²	- 4,00 m/s ²
- 1 m/s ² pro Entfernung (eigene)	300,00 m	300,00 m	400,00 m	200,00 m
Akzeptierte Verzögerung (eigene)	- 1,00 m/s ²	- 1,00 m/s ²	- 1,00 m/s ²	- 1,00 m/s ²
Maximale Verzögerung (Folgefahrzeug)	- 3,00 m/s ²	- 3,00 m/s ²	- 3,00 m/s ²	- 3,00 m/s ²
-1 m/s ² pro Entfernung (Folgefahrzeug)	200,00 m	200,00 m	400,00 m	200,00 m
Akzeptierte Verzögerung (Folgefahrzeug)	- 0,75 m/s ²	- 0,75 m/s ²	- 0,75 m/s ²	- 0,75 m/s ²
Wartezeit bis zur Diffusion	60,00 s	60,00 s	60,00 s	60,00 s
Min. Nettoweglücke	0,50 m	0,50 m	0,50 m	0,50 m
Auf langsameren FS wenn Kollisionszeit mind.	8,00 s	8,00 s	8,00 s	8,00 s
Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand	0,60	0,60	0,60	0,60
Maximalverzögerung für kooperatives Bremsen	- 3,00 m/s ²	- 3,00 m/s ²	- 3,00 m/s ²	- 3,00 m/s ²
Langsamfahrbereiche überholen	Nein	Nein	Nein	Nein
Intelligentes Einfädeln	Ja	Ja	Ja	Ja
Nach Routenentscheidung stromabwärts suchen	Nein	Nein	Nein	Nein
Kooperativer Fahrstreifenwechsel	Ja	Ja	Ja	Ja
Max. Geschw.-Differenz	10,80 km/h	10,80 km/h	10,80 km/h	10,80 km/h
Max. Kollisionszeit	10,00 s	10,00 s	10,00 s	10,00 s

10.1.4 LKW im Szenario SAE 4 mit 0,9 Sekunden Sicherheitsabstand

Folgeverhalten	LKW-HFB	LKW-Einfahrt-E1	LKW-Verflechtung-V1	LKW-Ausfahrt-A1
Vorausschauweite				
min	0,00 m	0,00 m	0,00 m	0,00 m
max	500,00 m	500,00 m	500,00 m	500,00 m
Vorderfahrzeuge	4	4	4	4
Zurückschauweite				
min	0,00 m	0,00 m	0,00 m	0,00 m
max	150,00 m	150,00 m	150,00 m	150,00 m
Fahrzeugfolgemodell	Wiedemann 99	Wiedemann 99	Wiedemann 99	Wiedemann 99
Modellparameter				
CC0	1,50 m	1,50 m	1,50 m	1,50 m
CC1	0,90 s	0,90 s	0,90 s	0,90 s
CC2	1,00 m	1,00 m	1,00 m	1,00 m
CC3	- 12,00	- 12,00	- 12,00	- 12,00
CC4	- 0,30	- 0,35	- 0,35	- 0,35
CC5	0,35	0,35	0,35	0,35
CC6	11,44	11,44	11,44	11,44
CC7	0,25 m/s ²	0,25 m/s ²	0,25 m/s ²	0,25 m/s ²
CC8	2,50 m/s ²	2,50 m/s ²	2,50 m/s ²	2,50 m/s ²
CC9	1,00 m/s ²	1,00 m/s ²	1,00 m/s ²	1,00 m/s ²
Fahrstreifenwechsel				
Grundverhalten	Rechtsfahrgebot	Rechtsfahrgebot	Rechtsfahrgebot	Rechtsfahrgebot
Notwendiger Fahrstreifenwechsel				
Maximale Verzögerung (eigene)	- 4,00 m/s ²	- 4,00 m/s ²	- 4,00 m/s ²	- 4,00 m/s ²
- 1 m/s ² pro Entfernung (eigene)	200,00 m	200,00 m	400,00 m	200,00 m
Akzeptierte Verzögerung (eigene)	- 1,00 m/s ²	- 1,00 m/s ²	- 1,00 m/s ²	- 1,00 m/s ²
Maximale Verzögerung (Folgefahrzeug)	- 3,00 m/s ²	- 3,00 m/s ²	- 3,00 m/s ²	- 3,00 m/s ²
-1 m/s ² pro Entfernung (Folgefahrzeug)	200,00 m	200,00 m	400,00 m	200,00 m
Akzeptierte Verzögerung (Folgefahrzeug)	- 0,50 m/s ²	- 0,50 m/s ²	- 0,50 m/s ²	- 0,50 m/s ²
Wartezeit bis zur Diffusion	60,00 s	60,00 s	60,00 s	60,00 s
Min. Nettoweglücke	0,50 m	0,50 m	0,50 m	0,50 m
Auf langsameren FS wenn Kollisionszeit mind.	1,00 s	1,00 s	1,00 s	1,00 s
Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand	0,60	0,60	0,60	0,60
Maximalverzögerung für kooperatives Bremsen	- 3,00 m/s ²	- 3,00 m/s ²	- 3,00 m/s ²	- 3,00 m/s ²
Langsamfahrbereiche überholen	Nein	Nein	Nein	Nein
Intelligentes Einfädeln	Nein	Ja	Ja	Ja
Nach Routenentscheidung stromabwärts suchen	Nein	Nein	Nein	Nein
Kooperativer Fahrstreifenwechsel	Nein	Nein	Nein	Nein
Max. Geschw.-Differenz				
Max. Kollisionszeit				

10.1.5 PKW im Szenario SAE 4 mit 1,8 Sekunden Sicherheitsabstand

Folgeverhalten	PKW-HFB	PKW-Einfahrt-E1	PKW-Verflechtung-V1	PKW-Ausfahrt-A1
Vorausschauweite				
min	0,00 m	0,00 m	0,00 m	0,00 m
max	250,00 m	250,00 m	250,00 m	250,00 m
Vorderfahrzeuge	1	1	1	1
Zurückschauweite				
min	0,00 m	0,00 m	0,00 m	0,00 m
max	150,00 m	150,00 m	150,00 m	150,00 m
Fahrzeugfolgemodell	Wiedemann 99	Wiedemann 99	Wiedemann 99	Wiedemann 99
Modellparameter				
CC0	2,00 m	2,00 m	2,00 m	2,00 m
CC1	1,80 s	1,80 s	1,80 s	1,80 s
CC2	1,80 m	1,80 m	1,80 m	1,80 m
CC3	- 10,00	- 10,00	- 10,00	- 10,00
CC4	- 0,30	- 0,35	- 0,35	- 0,35
CC5	0,35	0,35	0,35	0,35
CC6	11,44	11,44	11,44	11,44
CC7	0,25 m/s ²	0,25 m/s ²	0,25 m/s ²	0,25 m/s ²
CC8	3,50 m/s ²	3,50 m/s ²	3,50 m/s ²	3,50 m/s ²
CC9	1,50 m/s ²	1,50 m/s ²	1,50 m/s ²	1,50 m/s ²
Fahrstreifenwechsel	PKW-HFB	PKW-Einfahrt-E1	PKW-Verflechtung-V1	PKW-Ausfahrt-A1
Grundverhalten	Rechtsfahrgebot	Rechtsfahrgebot	Rechtsfahrgebot	Rechtsfahrgebot
Notwendiger Fahrstreifenwechsel				
Maximale Verzögerung (eigene)	- 4,00 m/s ²	- 4,00 m/s ²	- 4,00 m/s ²	- 4,00 m/s ²
- 1 m/s ² pro Entfernung (eigene)	300,00 m	300,00 m	400,00 m	200,00 m
Akzeptierte Verzögerung (eigene)	- 1,00 m/s ²	- 1,00 m/s ²	- 1,00 m/s ²	- 1,00 m/s ²
Maximale Verzögerung (Folgefahrzeug)	- 2,50 m/s ²	- 2,50 m/s ²	- 2,50 m/s ²	- 2,50 m/s ²
-1 m/s ² pro Entfernung (Folgefahrzeug)	200,00 m	200,00 m	400,00 m	200,00 m
Akzeptierte Verzögerung (Folgefahrzeug)	- 0,75 m/s ²	- 0,75 m/s ²	- 0,75 m/s ²	- 0,75 m/s ²
Wartezeit bis zur Diffusion	60,00 s	60,00 s	60,00 s	60,00 s
Min. Nettoweglücke	1,00 m	1,00 m	1,00 m	1,00 m
Auf langsameren FS wenn Kollisionszeit mind.	8,00 s	8,00 s	8,00 s	8,00 s
Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand	0,60	0,60	0,60	0,60
Maximalverzögerung für kooperatives Bremsen	- 3,00 m/s ²	- 3,00 m/s ²	- 3,00 m/s ²	- 3,00 m/s ²
Langsamfahrbereiche überholen	Nein	Nein	Nein	Nein
Intelligentes Einfädeln	Ja	Ja	Ja	Ja
Nach Routenentscheidung stromabwärts suchen	Nein	Nein	Nein	Nein
Kooperativer Fahrstreifenwechsel	Ja	Ja	Ja	Ja
Max. Geschw.-Differenz	10,80 km/h	10,80 km/h	10,80 km/h	10,80 km/h
Max. Kollisionszeit	10,00 s	10,00 s	10,00 s	10,00 s

10.1.6 LKW im Szenario SAE 4 mit 1,8 Sekunden Sicherheitsabstand

Folgeverhalten	LKW-HFB	LKW-Einfahrt-E1	LKW-Verflechtung-V1	LKW-Ausfahrt-A1
Vorausschauweite				
min	0,00 m	0,00 m	0,00 m	0,00 m
max	250,00 m	250,00 m	250,00 m	250,00 m
Vorderfahrzeuge	1	1	1	1
Zurückschauweite				
min	0,00 m	0,00 m	0,00 m	0,00 m
max	150,00 m	150,00 m	150,00 m	150,00 m
Fahrzeugfolgemodell	Wiedemann 99	Wiedemann 99	Wiedemann 99	Wiedemann 99
Modellparameter				
CC0	2,00 m	2,00 m	2,00 m	2,00 m
CC1	1,80 s	1,80 s	1,80 s	1,80 s
CC2	1,80 m	1,80 m	1,80 m	1,80 m
CC3	- 10,00	- 10,00	- 10,00	- 10,00
CC4	- 0,30	- 0,35	- 0,35	- 0,35
CC5	0,35	0,35	0,35	0,35
CC6	11,44	11,44	11,44	11,44
CC7	0,25 m/s ²	0,25 m/s ²	0,25 m/s ²	0,25 m/s ²
CC8	2,50 m/s ²	2,50 m/s ²	2,50 m/s ²	2,50 m/s ²
CC9	1,00 m/s ²	1,00 m/s ²	1,00 m/s ²	1,00 m/s ²
Fahrstreifenwechsel				
Grundverhalten	Rechtsfahrgebot	Rechtsfahrgebot	Rechtsfahrgebot	Rechtsfahrgebot
Notwendiger Fahrstreifenwechsel				
Maximale Verzögerung (eigene)	- 4,00 m/s ²	- 4,00 m/s ²	- 4,00 m/s ²	- 4,00 m/s ²
- 1 m/s ² pro Entfernung (eigene)	200,00 m	200,00 m	400,00 m	200,00 m
Akzeptierte Verzögerung (eigene)	- 1,00 m/s ²	- 1,00 m/s ²	- 1,00 m/s ²	- 1,00 m/s ²
Maximale Verzögerung (Folgefahrzeug)	- 2,50 m/s ²	- 2,50 m/s ²	- 2,50 m/s ²	- 2,50 m/s ²
-1 m/s ² pro Entfernung (Folgefahrzeug)	200,00 m	200,00 m	400,00 m	200,00 m
Akzeptierte Verzögerung (Folgefahrzeug)	- 0,50 m/s ²	- 0,50 m/s ²	- 0,50 m/s ²	- 0,50 m/s ²
Wartezeit bis zur Diffusion	60,00 s	60,00 s	60,00 s	60,00 s
Min. Nettoweglücke	1,00 m	1,00 m	1,00 m	1,00 m
Auf langsameren FS wenn Kollisionszeit mind.	1,00 s	1,00 s	1,00 s	1,00 s
Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand	0,60	0,60	0,60	0,60
Maximalverzögerung für kooperatives Bremsen	- 3,00 m/s ²	- 3,00 m/s ²	- 3,00 m/s ²	- 3,00 m/s ²
Langsamfahrbereiche überholen	Nein	Nein	Nein	Nein
Intelligentes Einfädeln	Nein	Ja	Ja	Ja
Nach Routenentscheidung stromabwärts suchen	Nein	Nein	Nein	Nein
Kooperativer Fahrstreifenwechsel	Nein	Nein	Nein	Nein
Max. Geschw.-Differenz				
Max. Kollisionszeit				

10.2 Permutation der Fahrverhalten in der Probandenstudie

Tabelle 6 Permutation der Fahrverhalten bei den FASI-Szenarien

	1. Simulation	2. Simulation	3. Simulation
Proband 1	SAE0	SAE4-0.9	SAE4-1.8
Proband 2	SAE4-1.8	SAE0	SAE4-0.9
Proband 3	SAE4-0.9	SAE4-1.8	SAE0
Proband 4	SAE0	SAE4-1.8	SAE4-0.9
Proband 5	SAE4-1.8	SAE4-0.9	SAE0
Proband 6	SAE4-0.9	SAE0	SAE4-1.8
Proband 7	SAE0	SAE4-0.9	SAE4-1.8
Proband 8	SAE4-1.8	SAE0	SAE4-0.9
Proband 9	SAE4-0.9	SAE4-1.8	SAE0
Proband 10	SAE0	SAE4-1.8	SAE4-0.9
Proband 11	SAE4-1.8	SAE4-0.9	SAE0
Proband 12	SAE4-0.9	SAE0	SAE4-1.8
Proband 13	SAE0	SAE4-0.9	SAE4-1.8
Proband 14	SAE4-1.8	SAE0	SAE4-0.9
Proband 15	SAE4-0.9	SAE4-1.8	SAE0
Proband 16	SAE0	SAE4-1.8	SAE4-0.9
Proband 17	SAE4-1.8	SAE4-0.9	SAE0
Proband 18	SAE4-0.9	SAE0	SAE4-1.8
Proband 19	SAE0	SAE4-0.9	SAE4-1.8
Proband 20	SAE4-1.8	SAE0	SAE4-0.9
Proband 21	SAE4-0.9	SAE4-1.8	SAE0
Proband 22	SAE0	SAE4-1.8	SAE4-0.9
Proband 23	SAE4-1.8	SAE4-0.9	SAE0
Proband 24	SAE4-0.9	SAE0	SAE4-1.8

10.3 Probandenfragebogen

10.3.1 Fragen zur Soziodemographie und zum Mobilitätsverhalten

Soziodemographie und Mobilitätsverhalten		
1) Welches Geschlecht haben Sie?		
<input type="checkbox"/> männlich		
<input type="checkbox"/> weiblich		
2) In welche Altersgruppe fallen Sie?		
<input type="checkbox"/> bis 24 Jahre	<input type="checkbox"/> 25 - 34 Jahre	<input type="checkbox"/> 35 - 49 Jahre
<input type="checkbox"/> 50-64 Jahre	<input type="checkbox"/> über 65 Jahre	
3) In welchem Land bzw. welchem Bundesland wohnen Sie?		
<input type="checkbox"/> Wien	<input type="checkbox"/> Oberösterreich	<input type="checkbox"/> Burgenland
<input type="checkbox"/> Niederösterreich	<input type="checkbox"/> Steiermark	<input type="checkbox"/> Salzburg
<input type="checkbox"/> Tirol	<input type="checkbox"/> Vorarlberg	<input type="checkbox"/> Kärnten
<input type="checkbox"/> Nicht-Österreich: _____		
4) Wie viele km fahren Sie durchschnittlich im Jahr mit dem PKW?		
<input type="checkbox"/> bis 500 km	<input type="checkbox"/> 501 bis 1.000 km	
<input type="checkbox"/> 1.001 bis 3.000 km	<input type="checkbox"/> 3.001 bis 5.000 km	
<input type="checkbox"/> 5.001 bis 10.000 km	<input type="checkbox"/> 10.001 bis 20.000 km	
<input type="checkbox"/> 20.001 bis 50.000 km	<input type="checkbox"/> >50.000 km	
<input type="checkbox"/> Keine Angabe, weiß nicht		
5) Wie viele km fahren Sie durchschnittlich im Jahr mit dem PKW auf österreichischen Autobahnen und Schnellstraßen?		
<input type="checkbox"/> bis 500 km	<input type="checkbox"/> 501 bis 1.000 km	
<input type="checkbox"/> 1.001 bis 3.000 km	<input type="checkbox"/> 3.001 bis 5.000 km	
<input type="checkbox"/> 5.001 bis 10.000 km	<input type="checkbox"/> 10.001 bis 20.000 km	
<input type="checkbox"/> 20.001 bis 50.000 km	<input type="checkbox"/> >50.000 km	
<input type="checkbox"/> Keine Angabe, weiß nicht		
6) Wie lange besitzen Sie bereits einen Führerschein?		
<input type="checkbox"/> weniger als 3 Jahre	<input type="checkbox"/> 3 – 7 Jahre	
<input type="checkbox"/> 7 – 15 Jahre	<input type="checkbox"/> mehr als 15 Jahre	

10.3.2 Fahrverhaltensbewertung der Simulationsszenarien

Fahrverhaltensbewertung der Simulationsszenarien

Szenario 1/2/3

1) Wie empfanden Sie den Fahrkomfort im Allgemeinen?

- sehr angenehm
- angenehm
- eher angenehm
- eher unangenehm
- unangenehm
- sehr unangenehm

Zusätzliche Anmerkungen:

2) Wie empfanden Sie das dynamische Fahrverhalten (Geschwindigkeits-, Beschleunigungs- und Bremsverhalten) der anderen Fahrzeuge bei Folgefahrten?

- sehr angenehm
- angenehm
- eher angenehm
- eher unangenehm
- unangenehm
- sehr unangenehm

Zusätzliche Anmerkungen:

3) Wie empfanden Sie das dynamische Fahrverhalten (Geschwindigkeits-, Beschleunigungs- und Bremsverhalten) der anderen Fahrzeuge beim Einfädeln und Ausfädeln?

- sehr angenehm
- angenehm
- eher angenehm
- eher unangenehm
- unangenehm
- sehr unangenehm

Zusätzliche Anmerkungen:

Fahrverhaltensbewertung der Simulationsszenarien

Szenario 1/2/3 Fortsetzung

4) Wie empfanden Sie das Abstandsverhalten der anderen Fahrzeuge bei Folgefahrten?

- sehr angenehm
- angenehm
- eher angenehm
- eher unangenehm
- unangenehm
- sehr unangenehm

Zusätzliche Anmerkungen:

5) Wie empfanden Sie das Abstandsverhalten der anderen Fahrzeuge beim Einfädeln und Ausfädeln?

- sehr angenehm
- angenehm
- eher angenehm
- eher unangenehm
- unangenehm
- sehr unangenehm

Zusätzliche Anmerkungen:

10.3.3 Fragen zum Fahrsimulator

Allgemeine Fragen zum Fahrsimulator

1) Am Fahrsimulator fühle ich mich wie in einem richtigen Auto?

- trifft voll zu
- trifft weitgehend zu
- trifft ein wenig zu
- trifft nicht zu

2) Am Fahrsimulator verhalte ich mich anders als auf der Straße?

- trifft voll zu
- trifft weitgehend zu
- trifft wenig zu
- trifft nicht zu

3) Mein Fahrverhalten im Fahrsimulator ist _____ als auf der Straße?

- defensiver
- eher defensiver
- eher aggressiver
- aggressiver

4) Das Fahren am Fahrsimulator verursacht mir im Allgemeinen Stress?

- trifft voll zu
- trifft weitgehend zu
- trifft wenig zu
- trifft nicht zu

10.3.4 Fragen zum automatisierten Fahren

Allgemeine Fragen zum automatisiertes Fahren

1) Kennen Sie den Begriff "automatisiertes Fahren", "Fahrerassistenzsystem" etc. und nutzen Sie ggf. bereits solche Technologien?

- Kenne ich nicht
- Ich habe die Begriffe schon einmal gehört, ich kann mir aber nicht vorstellen, was damit gemeint ist
- Ich kann mir vorstellen, was mit AF gemeint ist, habe allerdings noch nie persönlich damit zu tun gehabt
- Ich weiß was mit AF gemeint ist und kenne die unterschiedlichen Stufen des AF

Zusatzfrage, für Antwort 4)

- Ich habe Fahrerassistenzsysteme aktiv noch nie genutzt
- Ich habe Fahrerassistenzsysteme bereits ausprobiert
- Ich nutze Fahrerassistenzsysteme bereits regelmäßig aktiv

Erklärung AF:

Unter AF wird "das selbständige, zielgerichtete Fahren eines Fahrzeugs im realen Verkehr, ohne Eingriff des Fahrers" verstanden.

2) Glauben Sie, dass AF Einfluss auf Ihre Fahrhäufigkeit haben wird?

- Nein, ich werde nicht häufiger fahren
- Ja, ich werde häufiger fahren
- Ja, ich werde weniger häufiger fahren

Wenn ja, um wie viel Prozent? _____

3) Glauben Sie, dass AF Einfluss auf Ihre Fahrweiten haben wird?

- Nein, ich werde nicht weiter/länger fahren
- Ja, ich werde weiter/länger fahren

4) Möchten sie bei Ihrem nächsten Fahrzeug AF-Technologie haben?

- Ja
- Nein

10.4 Ergänzende grafische Darstellungen der Fragebogenauswertungen

10.4.1 Probandenakquirierende Stellen

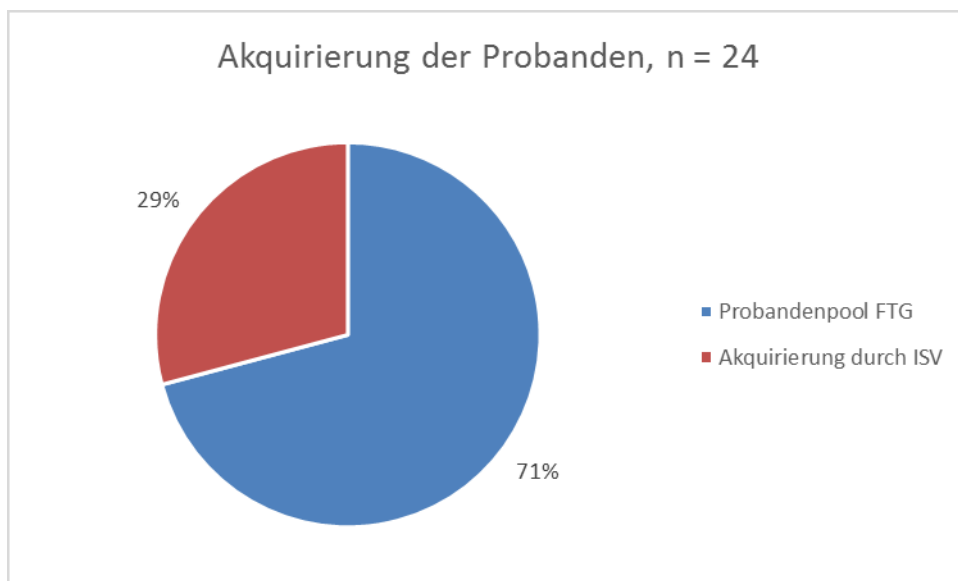


Abbildung 77 Probandenakquirierende Stellen

10.4.2 Soziodemographische Verteilungen

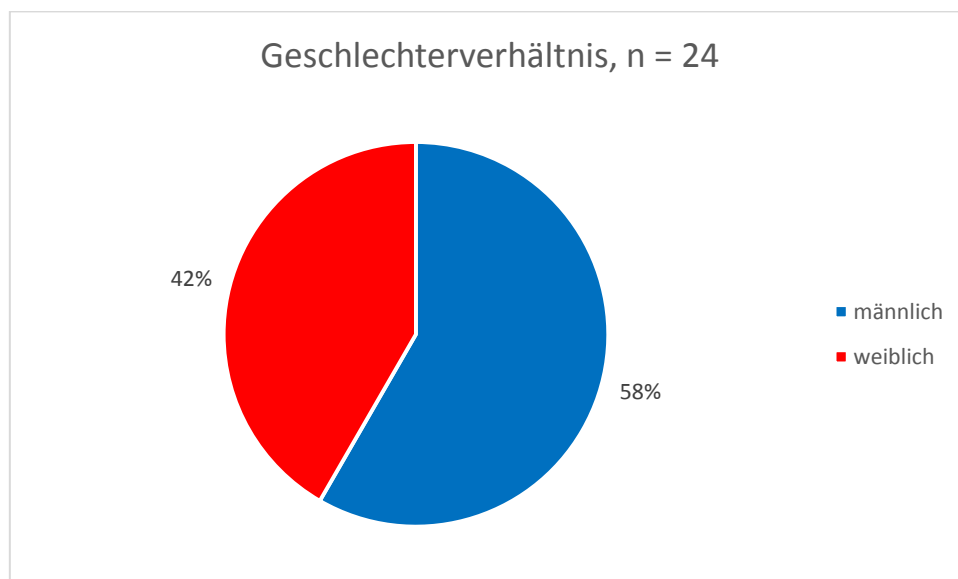


Abbildung 78 Geschlechterverhältnis der Probanden

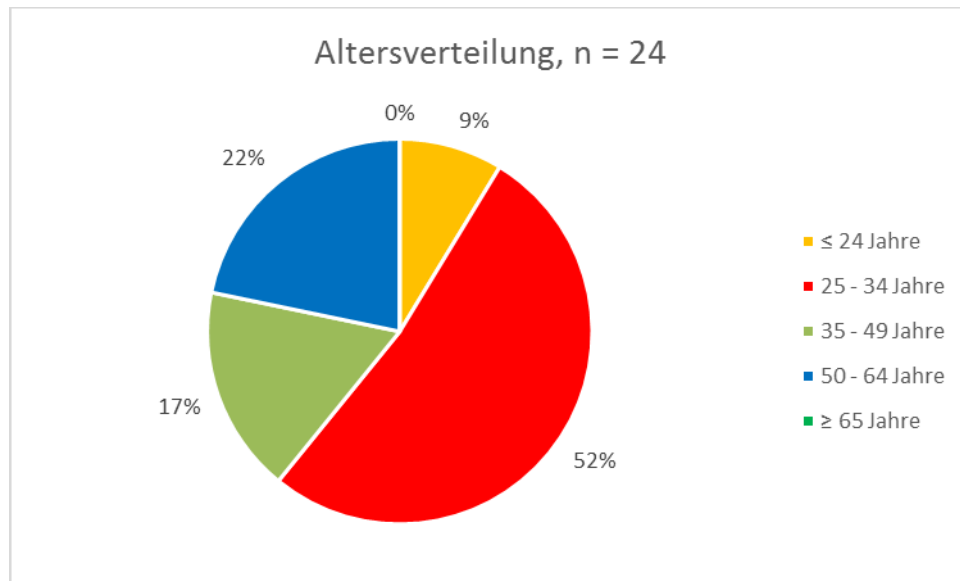


Abbildung 79 Altersverteilung der Probanden

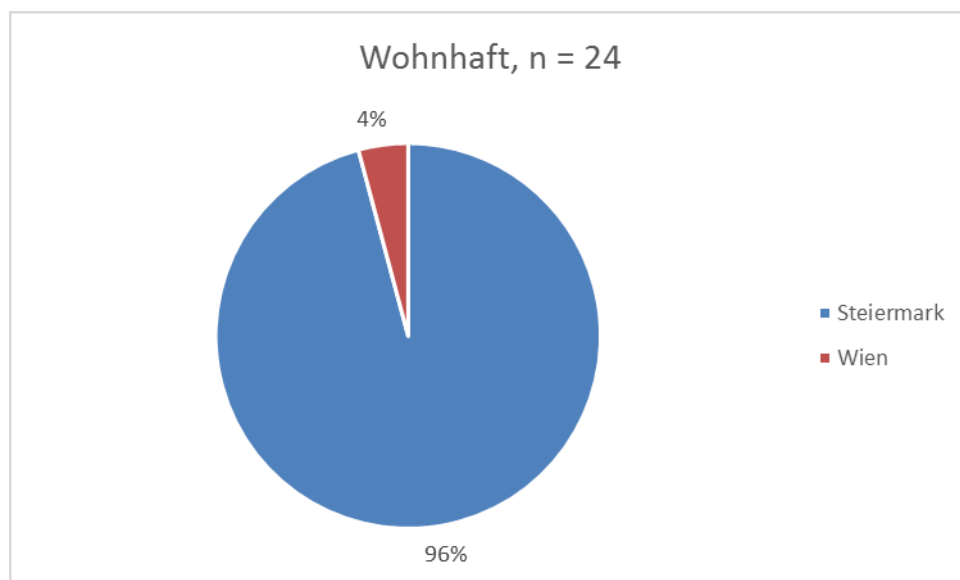


Abbildung 80 Wohnsitz der Probanden

10.4.3 Allgemeine Fragen zum automatisierten Fahren und Fahrassistenzsystemen

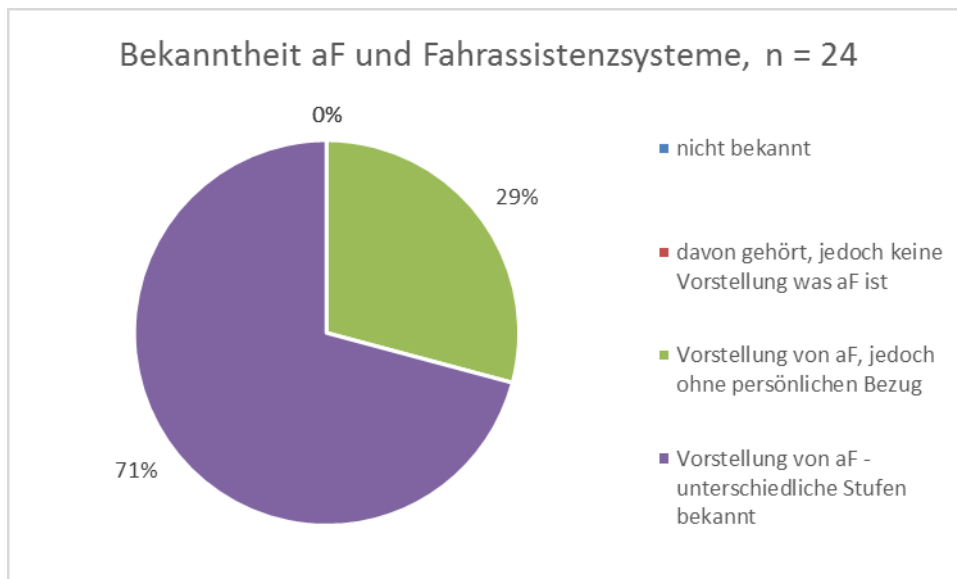


Abbildung 81 Bekanntheit von automatisiertem Fahren und Fahrassistenzsystemen

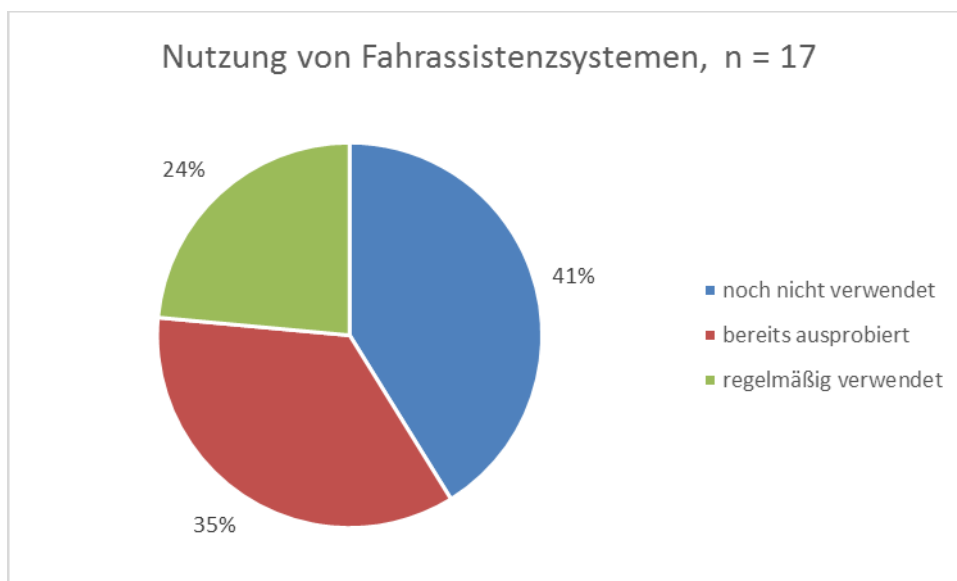


Abbildung 82 Nutzung von Fahrassistenzsystemen

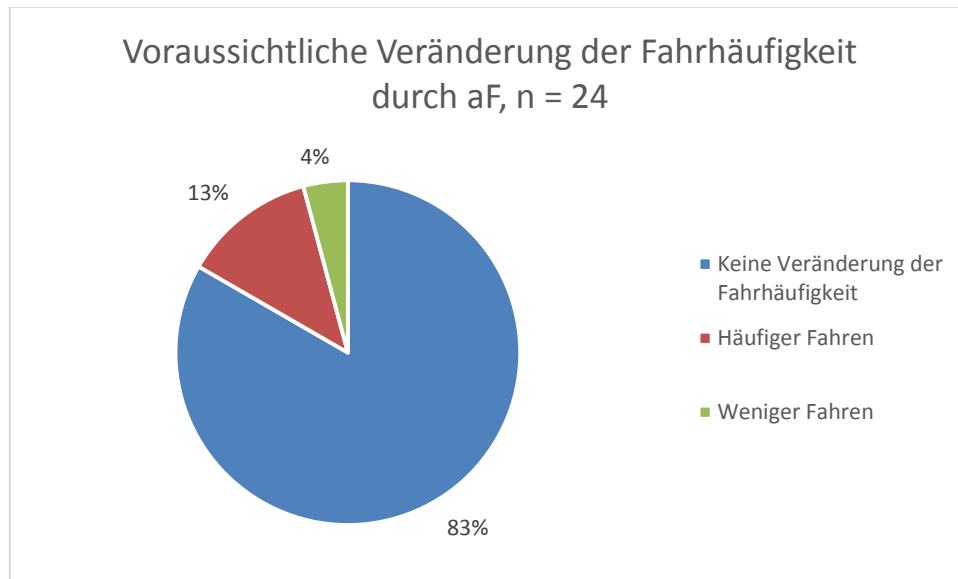


Abbildung 83 Einschätzung der Veränderung der Fahrhäufigkeit durch automatisiertes Fahren

Auf die Frage, ob automatisiertes Fahren in Zukunft einen Einfluss auf die persönliche Fahrhäufigkeit haben wird, haben etwas mehr als 80% der Probanden angegeben, dass aF keinen Einfluss auf die mit einem Pkw zurückgelegte Anzahl an Wegen haben wird. 13% der Probanden vermuten, dass sie durch automatisierte Fahrzeuge häufiger fahren werden. Nur rund 4% gehen davon aus, dass sie mit automatisierten Fahrzeugen seltener fahren.

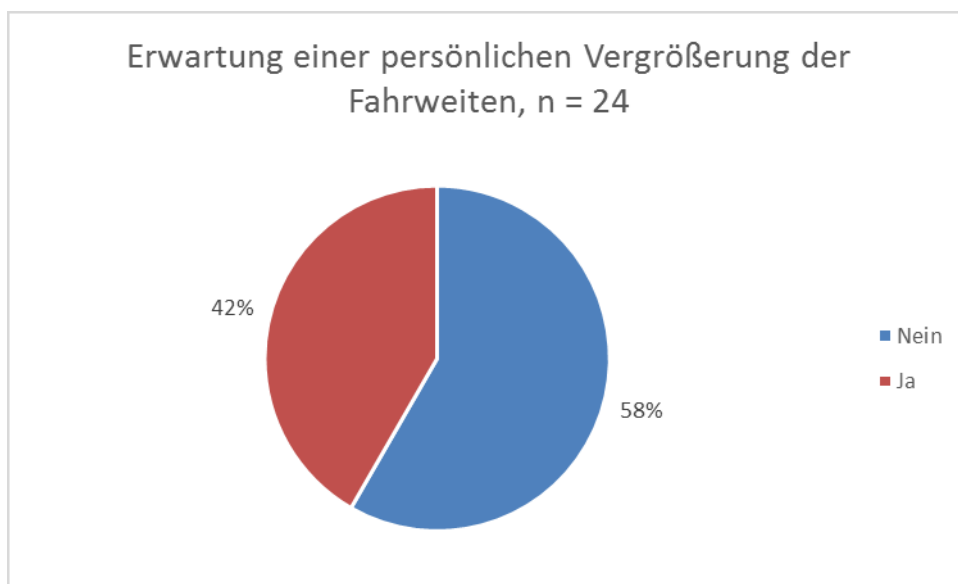


Abbildung 84 Erwartungen einer Vergrößerung der Fahrweiten

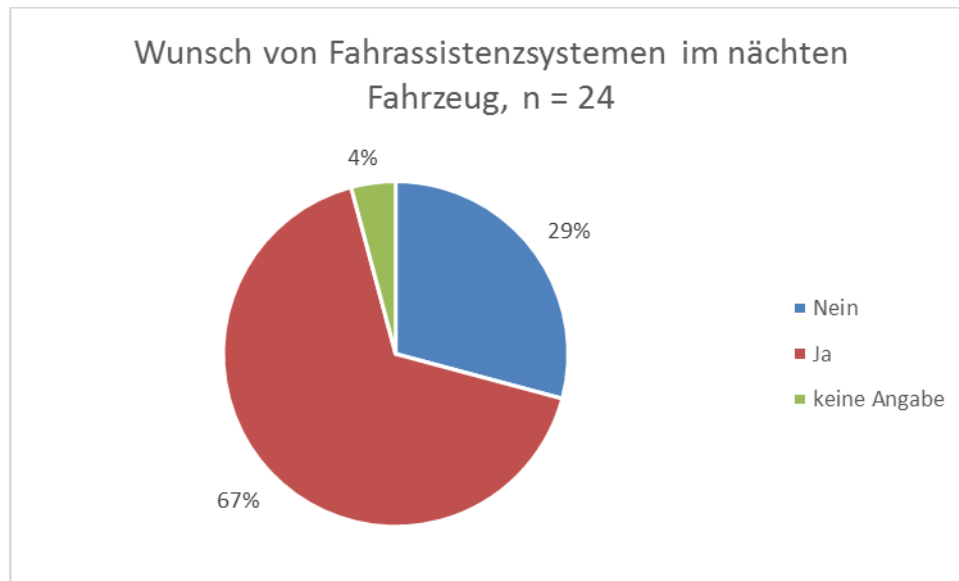


Abbildung 85 Wunsch von Fahrassistenzsystemen im nächsten Fahrzeug

10.5 Auszüge aus dem R-Code

Aufgrund des erhöhten Platzbedarfs und der erleichterten Lesbarkeit eines digitalen Codes in R-Studio, oder Texteditorprogrammen, welche Programmiersprachen unterstützen, wurden nur ausgewählte Teile des R-Codes im Anhang angeführt. Der komplette Skript-Code kann dem digitalen Anhang entnommen werden.

10.5.1 follow.R

Der *tabFront* data frame wurde über folgenden R-Code generiert:

```
# Erstellung der tabFront-Variablen, welche die Grunddaten fuer die
# Folgefahrten beinhaltet
for ( front_i in 2:(nrow(fasiFront)-1) ) {
  if ( front_i == (nrow(fasiFront)-1) ) {
    tempTab <- data.frame( "ID" = fasiFront[front_i, "ID"], "startSec"
      = fasiFront[front_i, "simsec"], "endSec" = NA, "tOf" = NA,
      "deltaSpeed" = NA, "distance" = NA, "min_tOf" = NA )
    #fasiFront[front_i, 11]

    if ( tempTab$ID != tabFront[nrow(tabFront), "ID"] ) {
      tabFront[nrow(tabFront), "endSec"] <- fasiFront[front_i - 1,
        "simsec"]
      tabFront[nrow(tabFront), "tOf"] <- tabFront[nrow(tabFront),
        "endSec"] - tabFront[nrow(tabFront), "startSec"]

      speedFzg <- data.frame( "speed" = NA )
      speedFASI <- data.frame( "speed" = NA )

      tabFront[nrow(tabFront), "drivStatEnd"] <- fasiFront[front_i -
        1, "drivState"]
      distance <- data.frame( "distance" = NA )
    }
  }
}
```

```
for ( temp_i in which(fasiFront$simsec ==
tabFront[nrow(tabFront), "startSec"]):which(fasiFront$simsec ==
tabFront[nrow(tabFront), "endSec"]) ) {
  speedFzg <- rbind( speedFzg, as.numeric(fasiFront[temp_i,
"speed"]) )
  distance <- rbind( distance, as.numeric(fasiFront[temp_i,
"distance"]) )
}

for (temp_i in which(datenfasi$simsec ==
tabFront[nrow(tabFront), "startSec"]): which(datenfasi$simsec
== tabFront[nrow(tabFront), "endSec"]) ) {
  speedFASI <- rbind( speedFASI, as.numeric(datenfasi[temp_i,
"speed"]) )
}

tabFront[nrow(tabFront), "deltaSpeed"] <- median(
speedFASI$speed, na.rm = TRUE ) - median( speedFzg$speed, na.rm
= TRUE )
tabFront[nrow(tabFront), "distance"] <- median(
distance$distance, na.rm = TRUE )
tabFront[nrow(tabFront), "min_tOf"] <- (tabFront[nrow(tabFront),
"distance"] / (abs(tabFront[nrow(tabFront),
"deltaSpeed"])/3.6))*f0s

} else if ( tempTab$ID != fasiFront[front_i + 1, "ID"] ) {
tabFront[nrow(tabFront), "endSec"] <- fasiFront[front_i,
"simsec"]
tabFront[nrow(tabFront), "tOf"] <- tabFront[nrow(tabFront),
"endSec"] - tabFront[nrow(tabFront), "startSec"]
tabFront[nrow(tabFront), "drivStatEnd"] <- fasiFront[front_i,
"drivState"]

speedFzg <- data.frame( "speed" = NA )
speedFASI <- data.frame( "speed" = NA )
distance <- data.frame( "distance" = NA )

for ( temp_i in which(fasiFront$simsec ==
tabFront[nrow(tabFront), "startSec"]):which(fasiFront$simsec ==
tabFront[nrow(tabFront), "endSec"]) ) {
  speedFzg <- rbind( speedFzg, as.numeric(fasiFront[temp_i,
"speed"]) )
  distance <- rbind( distance, as.numeric(fasiFront[temp_i,
"distance"]) )
}

for (temp_i in which(datenfasi$simsec ==
tabFront[nrow(tabFront), "startSec"]): which(datenfasi$simsec
== tabFront[nrow(tabFront), "endSec"]) ) {
  speedFASI <- rbind( speedFASI, as.numeric(datenfasi[temp_i,
"speed"]) )
}
}
```



```

tabFront[nrow(tabFront), "deltaSpeed"] <- median(
  speedFASI$speed, na.rm = TRUE ) - median( speedFzg$speed, na.rm
= TRUE )
tabFront[nrow(tabFront), "distance"] <- median(
  distance$distance, na.rm = TRUE )
tabFront[nrow(tabFront), "min_tOf"] <- (tabFront[nrow(tabFront),
"distance"] / (abs(tabFront[nrow(tabFront),
"deltaSpeed"])/3.6))*fOs
} else {
tabFront[nrow(tabFront), "endSec"] <- fasiFront[front_i,
"simsec"]
tabFront[nrow(tabFront), "tOf"] <- tabFront[nrow(tabFront),
"endSec"] - tabFront[nrow(tabFront), "startSec"]
tabFront[nrow(tabFront), "drivStatEnd"] <- fasiFront[front_i,
"drivState"]

speedFzg <- data.frame( "speed" = NA )
speedFASI <- data.frame( "speed" = NA )
distance <- data.frame( "distance" = NA )

for ( temp_i in which(fasiFront$simsec ==
tabFront[nrow(tabFront), "startSec"]):which(fasiFront$simsec ==
tabFront[nrow(tabFront), "endSec"]) ) {
  speedFzg <- rbind( speedFzg, as.numeric(fasiFront[temp_i,
"speed"]) )
  distance <- rbind( distance, as.numeric(fasiFront[temp_i,
"distance"]) )
}

for (temp_i in which(datenfasi$simsec ==
tabFront[nrow(tabFront), "startSec"]): which(datenfasi$simsec
== tabFront[nrow(tabFront), "endSec"]) ) {
  speedFASI <- rbind( speedFASI, as.numeric(datenfasi[temp_i,
"speed"]) )
}

tabFront[nrow(tabFront), "deltaSpeed"] <- median(
  speedFASI$speed, na.rm = TRUE ) - median( speedFzg$speed, na.rm
= TRUE )
tabFront[nrow(tabFront), "distance"] <- median(
  distance$distance, na.rm = TRUE )
tabFront[nrow(tabFront), "min_tOf"] <- (tabFront[nrow(tabFront),
"distance"] / (abs(tabFront[nrow(tabFront),
"deltaSpeed"])/3.6))*fOs
}

} else if ( fasiFront[front_i, "ID"] != fasiFront[front_i - 1, "ID"]
) {
tempTab <- data.frame( "ID" = fasiFront[front_i, "ID"], "startSec"
= fasiFront[front_i, "simsec"], "endSec" = NA, "tOf" = NA,
"drivStatEnd" = NA, "deltaSpeed" = NA, "distance" = NA,
"min_tOf" = NA )
tabFront[nrow(tabFront), "endSec"] <- fasiFront[front_i - 1,
"simsec"]

```

```

tabFront[nrow(tabFront), "tOf"] <- tabFront[nrow(tabFront),
"endSec"] - tabFront[nrow(tabFront), "startSec"]
tabFront[nrow(tabFront), "drivStatEnd"] <- fasiFront[front_i - 1,
"drivState"]
speedFzg <- data.frame( "speed" = NA )
speedFASI <- data.frame( "speed" = NA )
distance <- data.frame( "distance" = NA )

for ( temp_i in which(fasiFront$simsec == tabFront[nrow(tabFront),
"startSec"]):which(fasiFront$simsec == tabFront[nrow(tabFront),
"endSec"]) ) {
  speedFzg <- rbind( speedFzg, as.numeric(fasiFront[temp_i,
"speed"]) )
  distance <- rbind( distance, as.numeric(fasiFront[temp_i,
"distance"]) )
}

for (temp_i in which(datenfasi$simsec == tabFront[nrow(tabFront),
"startSec"]): which(datenfasi$simsec == tabFront[nrow(tabFront),
"endSec"]) ) {
  speedFASI <- rbind( speedFASI, as.numeric(datenfasi[temp_i,
"speed"]) )
}

tabFront[nrow(tabFront), "deltaSpeed"] <- median( speedFASI$speed,
na.rm = TRUE ) - median( speedFzg$speed, na.rm = TRUE )
tabFront[nrow(tabFront), "distance"] <- median( distance$distance,
na.rm = TRUE)
tabFront[nrow(tabFront), "min_tOf"] <- (tabFront[nrow(tabFront),
"distance"] / (abs(tabFront[nrow(tabFront),
"deltaSpeed"])/3.6))*fOs
tabFront <- rbind( tabFront, tempTab )
rm(distance, speedFASI, speedFzg, temp_i)
}

}

# Ende des Schreibens einer Tabelle mit den unterschiedlichen
Vorderfahrzeugen

```

10.5.2 timeframe.R

Nachfolgend wird aufgezeigt wie das Stufensystem zur Auswahl der FS-Wechsel in R implementiert wurde:

```

# Erstellung leerer data frames fuer die nachfolgende Ueberpruefung
der Einhaltung der Status-Abfolgen
potTab <- data.frame()
potLC1 <- data.frame()
potLC2 <- data.frame()
potLC3 <- data.frame()

# Schleife fuer die Berechnung/Filterung der FS-Wechselablauf-Zeiten
for (i in 2:length(simSecTotal)) {

```

```

currData <- fzp[fzp$simsec == simSecTotal[i], ]
if (i == 2) {
  oldData <- fzp[fzp$simsec == simSecTotal[1], ]
} else {
  oldData <- fzp[fzp$simsec == simSecTotal[i-1], ]
}

# Ausmustern falls eine ID im neuen Datensatz nicht mehr vorhanden
ist
for (j in 1:nrow(oldData)) {
  if (any(currData$ID == oldData[j, "ID"])) {
  } else {
    if (length(potTab) > 0) {
      if (any(potTab == oldData[j, "ID"])) {
        potTab <- potTab[-which(potTab == oldData[j, "ID"])]
      }
    }
    if (nrow(potLC1) > 0) {
      if (any(potLC1$ID == oldData[j, "ID"])) {
        potLC1 <- potLC1[-which(potLC1$ID == oldData[j, "ID"]), ]
      }
    }
    if (nrow(potLC2) > 0) {
      if (any(potLC2$ID == oldData[j, "ID"])) {
        potLC2 <- potLC2[-which(potLC2$ID == oldData[j, "ID"]), ]
      }
    }
  }
}

for (j in 1:nrow(currData)) {
  if (nrow(potLC2) > 0) {
    if (any(potLC2$ID == currData[j, "ID"])) {
      if (currData[j, "drivState"] == "Has changed lane") {

    } else if (oldData[oldData$ID == currData[j, "ID"],
      "drivState"] != currData[j, "drivState"]) {
      tempPotLC3 <- data.frame("ID" = currData[j, "ID"],
        "startSec" = potLC2[potLC2$ID == currData[j, "ID"],
        "startSec"], "LCSec" = potLC2[potLC2$ID == currData[j,
        "ID"], "LCSec"], "endSec" = currData[j, "simsec"])
      potLC3 <- rbind(potLC3, tempPotLC3)
      potLC2 <- potLC2[-which(potLC2$ID == currData[j, "ID"]), ]
      rm(tempPotLC3)
    }
  }
}

if (nrow(potLC1) > 0) {
  if (any(potLC1$ID == currData[j, "ID"])) {
    if (currData[j, "drivState"] == "Changing lane") {

```

```

    if (oldData[oldData$ID == currData[j, "ID"], "line"] !=
        currData[j, "line"]) {
      tempPotLC2 <- data.frame("ID" = currData[j, "ID"],
                              "startSec" = potLC1[potLC1$ID == currData[j, "ID"],
                              "startSec"], "LCSec" = currData[j, "simsec"])
      potLC2 <- rbind(potLC2, tempPotLC2)
      potLC1 <- potLC1[-which(potLC1$ID == currData[j, "ID"]), ]
      rm(tempPotLC2)
    }
  } else if (currData[j, "drivState"] == "Wants to change lane")
  {
  } else if (currData[j, "drivState"] == "Brakes for lane
  change") {
  } else {
    potLC1 <- potLC1[-which(potLC1$ID == currData[j, "ID"]), ]
  }
} else if (length(which(potLC1$ID == currData[j, "ID"]) > 1)) {
  print(paste0("Mehrerere Eintraege mit ID ", currData[j,
  "ID"]," in potLC1 vorhanden; i = ", i, "; j = ", j))
}
}
}
if (length(potTab) > 0) {
  if (any(potTab == currData[j, "ID"])) {
    if (currData[j, "drivState"] == "Wants to change lane") {
      tempPotLC1 <- data.frame("ID" = currData[j, "ID"],
                              "startSec" = currData[j, "simsec"])
      potLC1 <- rbind(potLC1, tempPotLC1)
      potTab <- potTab[-which(potTab == currData[j, "ID"])]
      rm(tempPotLC1)
    }
  } else if (currData[j, "drivState"] == "Default"){
    tempPotTab <- currData[j, "ID"]
    potTab <- rbind(potTab, tempPotTab)
  }
} else {
  if (currData[j, "drivState"] == "Default") {
    potTab <- rbind(potTab, currData[j, "ID"])
  }
}
}
}

uniqueIDs <- unique(potLC3$ID)
tfList <- data.frame()
if (length(uniqueIDs) > 0) {
  for (i in 1:length(uniqueIDs)) {
    tempID <- potLC3[potLC3$ID == uniqueIDs[i], ]
    tempList <- tempID[which(tempID$startSec == min(tempID$startSec)),
    ]
    tfList <- rbind(tfList, tempList)
  }
}

```

```

    rm(tempID, tempList)
  }
}

timeFrame <- data.frame()
if (nrow(tfList) > 0) {
  for (i in 1:nrow(tfList)) {
    tempTF <- data.frame("tbLC" = tfList[i, "LCSec"] - tfList[i,
      "startSec"], "taLC" = tfList[i, "endSec"] - tfList[i, "LCSec"])
    timeFrame <- rbind(timeFrame, tempTF)
    rm(tempTF)
  }
}

```

10.5.3 Boxplots.R

Beispielhaft wird an dieser Stelle der R-Skript-Code für die Erstellung eines Boxplots der unter Abschnitt 2.4 gezeigten fahrdynamischen Kenngrößen angeführt. Dabei beinhaltet der data frame *filter_fdK* die gesamten fahrdynamischen Kenngrößen aller natürlichen Probanden.

```

# Beschleunigungsrauschen
min <- min(filter_fdK$accNoise)
max <- max(filter_fdK$accNoise)
abw <- 0.05 * (max - min)
lowerLimit <- min - abw
upperLimit <- max + abw
windows(title = "Beschleunigungsrauschen")
par(mfrow = c(1,3), oma = c(2,2,3,2), cex.lab = 1.5, cex.axis = 1.5)
boxplot(Sz1$accNoise, ylim = c(lowerLimit, upperLimit), xlab =
  Szenario1, ylab = "[m2/s]", col = "blue")
text(1.25, median(Sz1$accNoise), labels = round(median(Sz1$accNoise),
  2), adj = 0, cex = 1.3)
text(1.25, quantile(Sz1$accNoise, probs = 0.25), labels =
  round(quantile(Sz1$accNoise, probs = 0.25), 2), adj = 0, cex = 1.3)
text(1.25, quantile(Sz1$accNoise, probs = 0.75), labels =
  round(quantile(Sz1$accNoise, probs = 0.75), 2), adj = 0, cex = 1.3)
boxplot(Sz2$accNoise, ylim = c(lowerLimit, upperLimit), xlab =
  Szenario2, col = "green")
text(1.25, median(Sz2$accNoise), labels = round(median(Sz2$accNoise),
  2), adj = 0, cex = 1.3)
text(1.25, quantile(Sz2$accNoise, probs = 0.25), labels =
  round(quantile(Sz2$accNoise, probs = 0.25), 2), adj = 0, cex = 1.3)
text(1.25, quantile(Sz2$accNoise, probs = 0.75), labels =
  round(quantile(Sz2$accNoise, probs = 0.75), 2), adj = 0, cex = 1.3)
boxplot(Sz3$accNoise, ylim = c(lowerLimit, upperLimit), xlab =
  Szenario3, col = "red")
text(1.25, median(Sz3$accNoise), labels = round(median(Sz3$accNoise),
  2), adj = 0, cex = 1.3)
text(1.25, quantile(Sz3$accNoise, probs = 0.25), labels =
  round(quantile(Sz3$accNoise, probs = 0.25), 2), adj = 0, cex = 1.3)
text(1.25, quantile(Sz3$accNoise, probs = 0.75), labels =
  round(quantile(Sz3$accNoise, probs = 0.75), 2), adj = 0, cex = 1.3)

```

```
mtext(paste0("Beschleunigungsrauschen; n = ", AzProb), side = 3, line
      = 0, font = 2, outer = TRUE)
dev.copy( png, filename =
  paste0(out_grafics,"Beschleunigungsrauschen.png"), width = 550,
  height = 600 )
dev.off()
```

10.5.4 follow_Plots.R

Beispielhaft wird an dieser Stelle der R-Skript-Code für die Erstellung einer Grafik mit individuell ausgewertetem Folgeverhalten aufgezeigt.

```
Proband_Nr <- 13
Szenario <- "SAE0_K60"
look <- "Front"
folgefahrt_Nr <- 1

shortSzen0 <- strsplit(Szenario, "_") [[1]]
shortSzen1 <- shortSzen0[1]
shortSzen2 <- shortSzen0[2]
if (shortSzen1 == "SAE4") {
  shortSzen <- paste0(shortSzen1,"_",shortSzen2)
} else {
  shortSzen <- shortSzen1
}
rm(shortSzen0, shortSzen1, shortSzen2)

trajectory <- read.table(file =
  paste0("../Auswertungen/Diagrams/follow/intSit/trajectories/Proband_",
  Proband_Nr,"-",Szenario,"-intSit",look,"_Nr_",folgefahrt_Nr,"-
  trajectory.csv"), header = TRUE, sep = ";", dec = ",")
cat("Proband ",Proband_Nr,", ", shortSzen,", Folgefahrt
  ",folgefahrt_Nr,": Geschwindigkeit (anderes Fahrzeug - Median) =
  ",median(traj$speed)," [km/h]")
tab <- data.frame("simsec" = NA, "distance" = NA, "deltaSpeed" = NA,
  "speed" = NA, "tpos" = NA)
tab[1, "simsec"] <- 131.15
tab[1, "distance"] <- round(trajectory[trajectory$simsec == tab[1,
  "simsec"], "distance"], 2)
tab[1, "deltaSpeed"] <- round(trajectory[trajectory$simsec == tab[1,
  "simsec"], "deltaSpeed"], 2)
tab[1, "speed"] <- round(trajectory[trajectory$simsec == tab[1,
  "simsec"], "speed"], 2)
tab[1, "tpos"] <- 1
tab[2, "simsec"] <- 133.35
tab[2, "distance"] <- round(trajectory[trajectory$simsec == tab[2,
  "simsec"], "distance"], 2)
tab[2, "deltaSpeed"] <- round(trajectory[trajectory$simsec == tab[2,
  "simsec"], "deltaSpeed"], 2)
tab[2, "speed"] <- round(trajectory[trajectory$simsec == tab[2,
  "simsec"], "speed"], 2)
tab[2, "tpos"] <- 4
tab[3, "simsec"] <- 139.25
```

```

tab[3, "distance"] <- round(trajjectory[trajjectory$simsec == tab[3,
  "simsec"], "distance"], 2)
tab[3, "deltaSpeed"] <- round(trajjectory[trajjectory$simsec == tab[3,
  "simsec"], "deltaSpeed"], 2)
tab[3, "speed"] <- round(trajjectory[trajjectory$simsec == tab[3,
  "simsec"], "speed"], 2)
tab[3, "tpos"] <- 3
tab[4, "simsec"] <- 140.60
tab[4, "distance"] <- round(trajjectory[trajjectory$simsec == tab[4,
  "simsec"], "distance"], 2)
tab[4, "deltaSpeed"] <- round(trajjectory[trajjectory$simsec == tab[4,
  "simsec"], "deltaSpeed"], 2)
tab[4, "speed"] <- round(trajjectory[trajjectory$simsec == tab[4,
  "simsec"], "speed"], 2)
tab[4, "tpos"] <- 4
tab[5, "simsec"] <- 147
tab[5, "distance"] <- round(trajjectory[trajjectory$simsec == tab[5,
  "simsec"], "distance"], 2)
tab[5, "deltaSpeed"] <- round(trajjectory[trajjectory$simsec == tab[5,
  "simsec"], "deltaSpeed"], 2)
tab[5, "speed"] <- round(trajjectory[trajjectory$simsec == tab[5,
  "simsec"], "speed"], 2)
tab[5, "tpos"] <- 1
tab[6, "simsec"] <- 148.60
tab[6, "distance"] <- round(trajjectory[trajjectory$simsec == tab[6,
  "simsec"], "distance"], 2)
tab[6, "deltaSpeed"] <- round(trajjectory[trajjectory$simsec == tab[6,
  "simsec"], "deltaSpeed"], 2)
tab[6, "speed"] <- round(trajjectory[trajjectory$simsec == tab[6,
  "simsec"], "speed"], 2)
tab[6, "tpos"] <- 2
trajjectory <- cbind(trajjectory, "color" = frontCol, "cex" = 1)
trajjectory[1, "color"] <- "blue"
trajjectory[nrow( trajjectory ), "color"] <- "orange"
trajjectory[1, "cex"] <- 2
trajjectory[nrow( trajjectory ), "cex"] <- 2
windows()
plot( trajjectory$deltaSpeed, trajjectory$distance, main =
  "Folgeverhalten", sub = paste0("Proband Nr: ", Proband_Nr, " -
  ", shortSzen, " - Folgefahrt Nr: ", folgefahrt_Nr), xlab =
  "Geschwindigkeitsdifferenz [km/h]", ylab = "Abstand [m]", xlim = c( -
  20, 20 ), ylim = c( 0, 60 ), type = "p", pch = 20, col =
  trajjectory$color, cex = trajjectory$cex ) # paste0("Proband
  ", Proband_Nr, " - ", Szenario, " --> Folgefahrt Nr: ", frontNr)
legend( -20, 60, legend = c( "Startpunkt", "Endpunkt" ), col = c(
  trajjectory[1, "color"], trajjectory[nrow(trajjectory), "color"] ), pch
  = 16, cex = 0.8, title = "Legende", bg = "grey95" )
for (i_text in 1:nrow(tab)) {
  if (tab[i_text, "tpos"] %% 2 == 0) {
    text( tab[i_text, "deltaSpeed"], tab[i_text, "distance"], labels =
      paste0(tab[i_text, "deltaSpeed"], " km/h, ", tab[i_text,
        "distance"], " m"), cex = 0.8, pos = tab[i_text, "tpos"] )
  } else {

```

```

      text( tab[i_text, "deltaSpeed"], tab[i_text, "distance"], labels =
        paste0(tab[i_text, "distance"]," m"), cex = 0.8, pos =
          tab[i_text, "tpos"] )
    }
  }
text(x = 0, y = 10, labels = paste0(trajectory[trajectory$simsec ==
  tab[1, "simsec"], "speed"]," km/h"))
text(x = 0, y = 36, labels = paste0(trajectory[trajectory$simsec ==
  tab[3, "simsec"], "speed"]," km/h"))
text(x = 0, y = 27, labels = paste0(trajectory[trajectory$simsec ==
  tab[5, "simsec"], "speed"]," km/h"))
dev.copy( png, file =
  paste0("../Auswertungen/Diagrams/follow/graphics/detail/Proband_", Pro
band_Nr, "-", shortSzen, "-", look, "-FF_Nr_", folgefahrt_Nr, ".png"), width
  = 550, height = 600 )
dev.off()

```

10.5.5 LC_Evaluation.R

Wie in Unterabschnitt 5.4.3 beschrieben erfolgt eine Auswertung der Zeitspannen zwischen den Zeitpunkten der Entscheidung zum FS-Wechsel und dem in den *.fzp-Dateien protokollierten FS-Wechsel über die im nachfolgenden Code angeführten Bedingungen. Da die auszuwertenden Simulationssekunden aus dem *simSecTotal*-data frame stammen, galten auch bei diesen Analysen die im Unterabschnitt 5.2.2 definierten Startbedingungen.

```

for (i in 2:length(simSecTotal)) {
  currData <- fzp[fzp$simsec == simSecTotal[i], ]
  oldData <- fzp[fzp$simsec == simSecTotal[i-1], ]

  for (j in 1:nrow(currData)) {
    if (any(oldData$ID == currData[j, "ID"])) {
      if (currData[j, "drivState"] == "Changing lane") {
        if (oldData[oldData$ID == currData[j, "ID"], "drivState"] !=
          "Changing lane") {
          tempTab <- data.frame("ID" = currData[j, "ID"], "startSec" =
            currData[j, "simsec"], "endSec" = NA, "time" = NA)
          tab1 <- rbind(tab1, tempTab)
        } else if (currData[j, "line"] != oldData[oldData$ID ==
          currData[j, "ID"], "line"]) {
          if (any(tab1$ID == currData[j, "ID"])) {
            tempTab1 <- tab1[tab1$ID == currData[j, "ID"], ]
            tempTab1$endSec <- currData[j, "simsec"]
            tempTab1$time <- tempTab1$endSec - tempTab1$startSec
            tempTab1 <- cbind("Proband" = Proband_Nr, "Szenario" =
              Szenario, tempTab1)
            LCtab <- rbind(LCtab, tempTab1)
            tab1 <- tab1[-which(tab1$ID == currData[j, "ID"]), ]
          }
        }
      }
    }
  }
}

```



```

}
write.table(LCtab, file = paste0(outFile_LC, "/table/LCtime.csv"),
row.names = FALSE, sep = ";", dec = ",")

```

Im zweiten Teil des Skripts „LC_Evaluation.R“ wurde eine Analyse der Folgeabstände und der Zeiten bis zur Kollision bei Fahrstreifenwechsel durch VISSIM-Fahrzeugen vor das Ego-Fahrzeug durchgeführt. Hierfür mussten zunächst die von den Probanden erwähnten Situationen in den *.fzp-Dateien manuell identifiziert werden. Diese wurden in einer *.csv-Datei abgespeichert und unter *ausw_LC* eingelesen.

```

ausw_LC <- read.table(file = path1, header = T, sep = ";", dec = ",")
if (file.exists(path2)) {
  file.remove(path2)
}

for (i_notes in 1:nrow(ausw_LC)) {
  sS <- ausw_LC[i_notes, "Sekunde"]
  Proband <- ausw_LC[i_notes, "Proband"]
  Szen <- paste0(ausw_LC[i_notes, "Szenario"], "_K60")
  shortSzen <- ausw_LC[i_notes, "Szenario"]

  fullTab <- read.table(file =
  paste0("../Auswertungen/Surrounding/fullSurrounding/Proband_", Prob
  and, "-", Szen, "-fullSurrounding.csv"), header = TRUE, sep = ";",
  dec = ",")
  currData <- fullTab[fullTab$simsec == sS, ]
  currFasi <- currData[currData$ID == fasiID, ]
  currLane <- currData[currData$line == currFasi$line, ]
  frontID <- currLane[currLane$middlePos > currFasi$middlePos, "ID"]
  if (length(frontID) > 1) {
    tempFront <- currData[currData$line == currFasi$line, ]
    frontID <- tempFront[tempFront$middlePos ==
    min(tempFront$middlePos), "ID"]
  }
  totSec <- unique(fullTab$simsec)

  # Erstellen einer Trajektorientabelle vom betrachteten Fahrzeug
  und dem vorausfahrenden Fahrzeug
  tempTraj <- fullTab[fullTab$ID == frontID, ]
  fasiTraj <- fullTab[fullTab$ID == fasiID, ]

  # Bestimmen des Zeitpunktes bei unmittelbar nach dem Umsprung des
  Fahrstreifens im fzp
  i_sec <- which(totSec == sS)
  while(any(fullTab[fullTab$simsec == totSec[(i_sec - 1)], "ID"] ==
  frontID)) {
    if (tempTraj[tempTraj$simsec == totSec[(i_sec - 1)], "line"] ==
    currFasi$line) {
      i_sec <- i_sec - 1
    }
  }
}

```

```
    } else {
      break
    }
  }
  i_secStart <- i_sec

# Bestimmung des letzten Zeitpunktes bei dem ein nachfolgen
# stattfand
i_sec <- which(totSec == sS)
while(any(fullTab[fullTab$simsec == totSec[(i_sec + 1)], "ID"] ==
  frontID)) {
  if (tempTraj[tempTraj$simsec == totSec[(i_sec + 1)], "line"] ==
    currFasi$line) {
    if (fasiTraj[fasiTraj$simsec == totSec[(i_sec + 1)], "line"]
      == currFasi$line) {
      i_sec <- i_sec + 1
    } else {
      break
    }
  } else {
    break
  }
}
i_secEnd <- i_sec

# Trajektorie des vorausfahrenden Fahrzeugs in der Zeitspanne, in
# der der beide Fahrzeuge am selben Fahrstreifen fahren
sLane <- tempTraj[which(tempTraj$simsec ==
  totSec[i_secStart]):which(tempTraj$simsec == totSec[i_secEnd]), ]

# Bestimmen der kleinsten Distanz zwischen den Fahrzeugen, solange
# sie sich am selben Fahrstreifen befunden haben
minDist <- min(sLane$distance)
secMinDist <- min(sLane[sLane$distance == minDist, "simsec"])
deltaSpeedMinDist <- sLane[sLane$simsec == secMinDist,
  "deltaSpeed"]
fasiSpeedMinDist <- (sLane[sLane$simsec == secMinDist, "speed"] +
  sLane[sLane$simsec == secMinDist, "deltaSpeed"])
accFasiMinDist <- fasiTraj[fasiTraj$simsec == secMinDist, "acc"]

# Zeitpunkt unmittelbar nach dem Fahrstreifenwechsel im fzp
secLC <- totSec[i_secStart]

# Geschwindigkeit im Zeitpunkt des FS-Wechsels im fzp
speedLC <- tempTraj[tempTraj$simsec == secLC, "speed"]

# Beschleunigung des FASIs im Zeitpunkt des FS-Wechsels
accFasiLC <- fasiTraj[fasiTraj$simsec == secLC, "acc"]

# Bestimmung der Sekunde bei der entweder ein Wechselwunsch
# entstand oder ein Wechsel begonnen wurde
```

```

i_sec <- i_secStart
if (tempTraj[tempTraj$simsec == totSec[(i_sec)], "drivState"] ==
    "Changing lane") {
  while(tempTraj[tempTraj$simsec == totSec[(i_sec)], "drivState"]
    != "Default") {
    if (nrow(tempTraj[tempTraj$simsec == totSec[(i_sec - 1)], ]) >
      0) {
      if (tempTraj[tempTraj$simsec == totSec[(i_sec - 1)],
        "drivState"] == "Has changed lane") {
        break
      }
      i_sec <- i_sec - 1
    } else {
      break
    }
  }
} else {
  print(paste0("drivState zum Zeitpunkt des Wechsels
    (",totSec[i_sec],") nicht 'Changing lane'"))
}
startSec <- totSec[i_sec]

# Bestimmung der Distanz der beiden betrachteten Fahrzeuge
zueinander unmittelbar nach dem Beginn (Beschluss) des FS-Wechsels
distStart <- tempTraj[tempTraj$simsec == startSec, "distance"]

# Bestimmung der Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs in
der startSec
speedStart <- tempTraj[tempTraj$simsec == startSec, "speed"]

# Bestimmung der Geschwindigkeitsdifferenz in der startSec
deltaSpeedStart <- tempTraj[tempTraj$simsec == startSec,
  "deltaSpeed"]

# Bestimmung der Fasi-Geschwindigkeit in der startSec
fasiSpeedStart <- fasiTraj[fasiTraj$simsec == startSec, "speed"]

# Bestimmung der Fasi-Beschleunigung in der startSec
accFasiStart <- fasiTraj[fasiTraj$simsec == startSec, "acc"]

# ttc - Start
ttcStart <- tempTraj[tempTraj$simsec == startSec, "ttc"]

# Bestimmung der größten Geschwindigkeitsabweichung auf dem
selben FS nach (während) dem FS-Wechsel
secMaxDeltaSpeed <- min(sLane[sLane$deltaSpeed ==
  min(sLane$deltaSpeed), "simsec"])
maxDeltaSpeed <- min(sLane$deltaSpeed)
maxNegAcc <- min(fasiTraj$acc)

```

```

if (startSec < secLC) {
  temp_Prob_Notes <- data.frame("Proband" = Proband, "Szenario" =
    shortSzen, "ID" = frontID, "startSec" = startSec, "distStart" =
    distStart, "speedStart" = speedStart, "deltaSpeedStart" =
    deltaSpeedStart, "fasiSpeedStart" = fasiSpeedStart, "ttcStart"
    = ttcStart, "accFasiStart" = accFasiStart, "secMinDist" =
    secMinDist, "minDist" = minDist, "fasiSpeedMinDist" =
    fasiSpeedMinDist, "deltaSpeedMinDist" = deltaSpeedMinDist,
    "accFasiMinDist" = accFasiMinDist, "secLC" = secLC, "speedLC" =
    speedLC, "accFasiLC" = accFasiLC, "secMaxDeltaSpeed" =
    secMaxDeltaSpeed, "maxDeltaSpeed" = maxDeltaSpeed, "maxNegAcc"
    = maxNegAcc)

  auxiliary <-
    paste0(Proband,"_",shortSzen,"_",frontID,"_",startSec)

  if (file.exists(path2)) {
    Prob_Notes <- read.table(file = path2, header = T, sep = ";",
      dec = ",")
    Prob_Notes <- cbind(Prob_Notes, "auxiliary" = NA)
    for (i_PN in 1:nrow(Prob_Notes)) {
      Prob_Notes[i_PN, "auxiliary"] <- paste0(Prob_Notes[i_PN,
        "Proband"], "_", Prob_Notes[i_PN,
        "Szenario"], "_", Prob_Notes[i_PN, "ID"], "_", Prob_Notes[i_PN,
        "startSec"])
    }
    if (any(Prob_Notes$auxiliary == auxiliary)) {
      Prob_Notes <- Prob_Notes[-which(Prob_Notes$auxiliary ==
        auxiliary), ]
    }
    Prob_Notes$auxiliary <- NULL
  } else {
    Prob_Notes <- data.frame()
  }

  Prob_Notes <- rbind(Prob_Notes, temp_Prob_Notes)
  Prob_Notes <- Prob_Notes[order(Prob_Notes[, "Proband"],
    Prob_Notes[, "Szenario"], Prob_Notes[, "startSec"]), ]

  # Speichern der Prob_Notes in einer Datei
  write.table(Prob_Notes, file = path2, row.names = FALSE,
    col.names = TRUE, sep = ";",dec = ",")
}

rm(Prob_Notes)
}

```

10.5.6 Zusammenhang_Fahrdauer-Startposition.R

Zur Überprüfung, ob ein Zusammenhang zwischen der Startposition und der Fahrdauer besteht, wurde folgende Regressionsanalyse in R durchgeführt:

```
setwd("C:/Users/Georg/Desktop/Masterarbeit-2017/Abgabe/Skripts")
```

```
Szenario1 <- "SAE0_K60"
Szenario2 <- "SAE4_0.9_K60"
Szenario3 <- "SAE4_1.8_K60"
sP <- data.frame()

for (Proband_Nr in 1:24) {
  for (Szenario_Nr in 1:3) {
    Szenario = eval(as.symbol(paste0("Szenario",Szenario_Nr)))
    path1 <-
      paste0("../Auswertungen/Surrounding/fullSurrounding/Proband_",Proband_Nr,"-",Szenario,"-fullSurrounding.csv")
    fS <- read.table(path1, header = T, sep = ";", dec = ",")
    sP <- rbind(sP, "startSec" = fS[1, "simsec"])
    rm(fS)
    gc()
  }
}
fK <-
  read.table(paste0("../Auswertungen/fahrdyn/fahrdynamischeKenngroessen.csv"), header = T, sep = ";", dec = ",")
fK <- fK[fK$Proband <= 24, ]

fm <- lm(fK$Dauer ~ sP$X93.4)
summary(fm)
anova(fm)
```

Eine Überprüfung mittels F-Test hat ergeben, dass ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Fahrdauer und der Startposition (indirekt die ausgewertete Streckenlänge) ergibt. Allerdings hat sich bei dem adjustierten Bestimmtheitsmaß (R^2) lediglich ein Erklärungsanteil von rund 6% ergeben. Es kann somit festgehalten werden, dass ein Zusammenhang zwischen der Fahrdauer und der Startposition der Auswertungen besteht, die Werte der Fahrdauer jedoch nicht über die Startposition definiert (erklärt) werden können.

10.6 Untersuchtes Fahrverhalten der VISSIM-Fahrzeuge

10.6.1 Folgeverhalten bei Kolonnenbildung

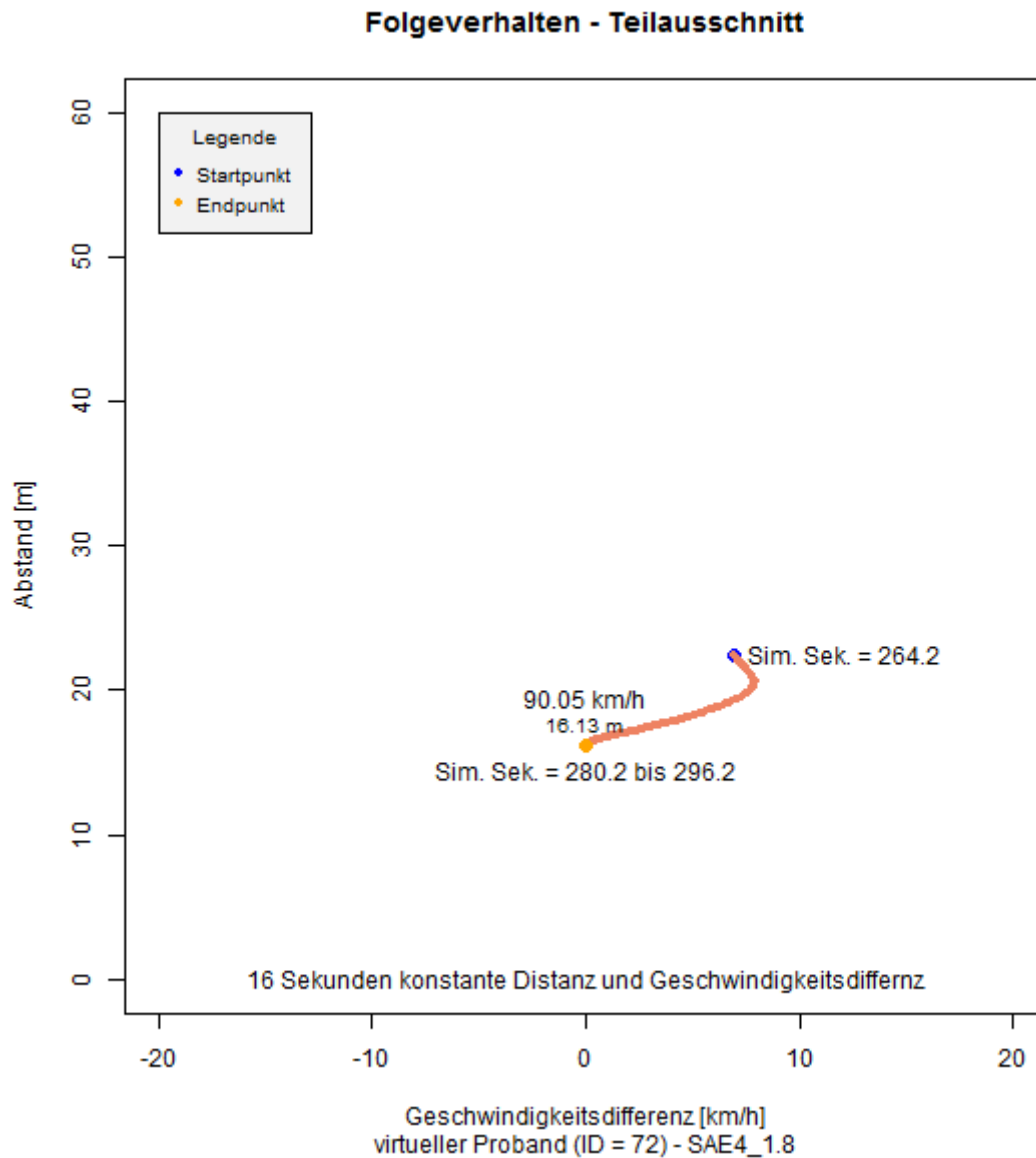


Abbildung 86 Teilausschnitt einer Folgefahrt eines automatisierten Fahrzeugs im Platoon

Abbildung 86 zeigt einen Teilausschnitt eines Folgeverhaltens von VISSIM-Fahrzeugen, welche sich zu einem Platoon zusammengeschlossen haben. Die Platoonbildung wurde, wie im Unterabschnitt 3.1.6 beschrieben, unter der Annahme kommunizierender Fahrzeuge gebildet. Somit wurden etwaige Änderungen der Geschwindigkeit vom führenden Fahrzeug unmittelbar an das nachfolgende Fahrzeug weitergeleitet. Das nachfolgende Fahrzeug konnte somit nahezu ohne Zeitverluste auf etwaige Änderungen reagieren, wodurch eine Oszillation wie beim menschlichen Fahrverhalten ausblieb. In Abbildung 86 zeigt sich das Platoon dadurch, dass die beiden Fahrzeuge über eine Dauer von 16 Sekunden exakt die selben Geschwindigkeiten (Differenzgeschwindigkeit = 0 km/h) und die selbe Distanz eingehalten haben. Dabei hat sich der Folgeabstand konstant bei rund 0,6 Sekunden gehalten.

10.6.2 Abweichungen vom gewünschten Fahrverhalten der VISSIM-Fahrzeuge bei Einspeisung eines externen Fahrverhaltens

Obwohl das programmierte Fahrverhalten in der MATLAB/Simulink – Umgebung und zusätzlich im Fahrsimulator getestet wurde, haben sich Situationen ergeben, in welchen das angestrebte Fahrverhalten nicht immer eingehalten wurde. Ein Beispiel dafür zeigt Abbildung 87.

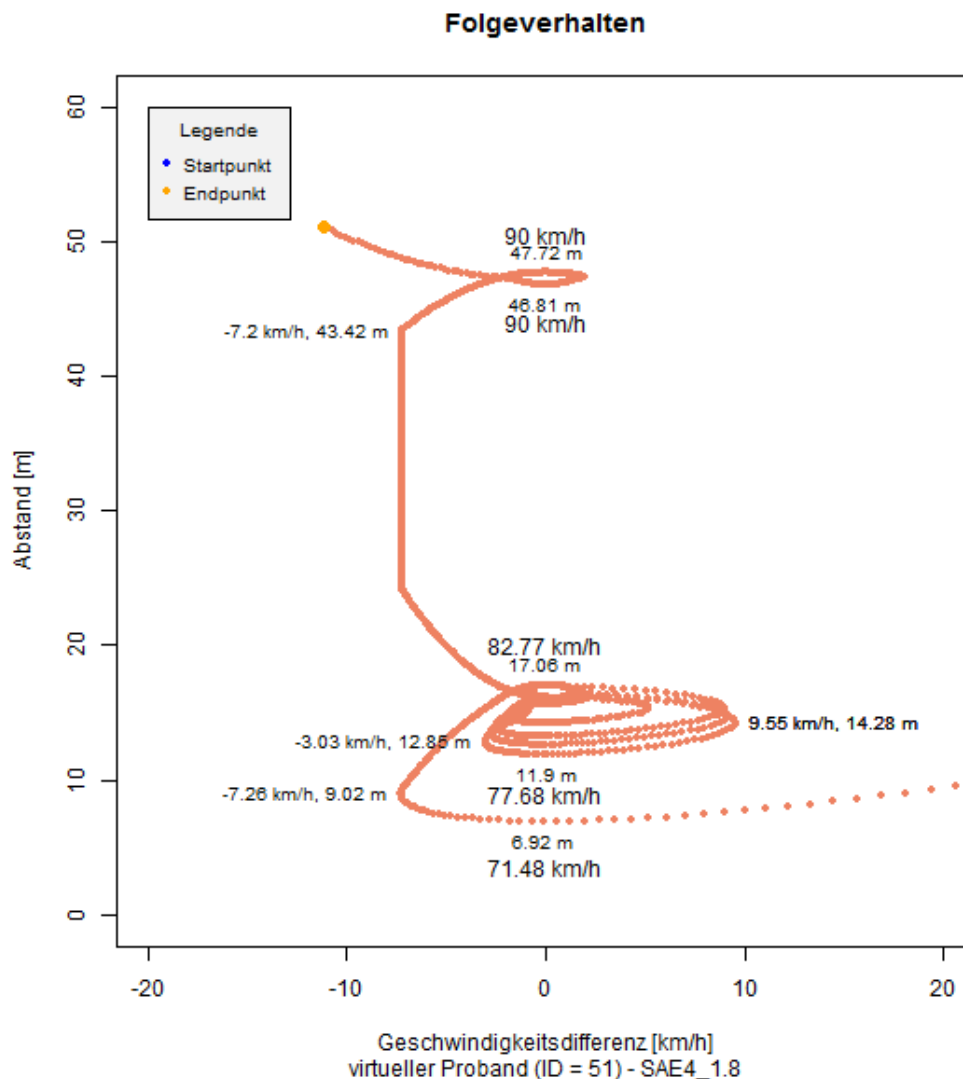


Abbildung 87 Folgeabstände zweier VISSIM-Fahrzeuge unterschiedlicher Fahrzeugkategorien (LKW und PKW) in einem Szenario mit einem angestrebten Folgeabstand von 1,8 Sekunden

In der oben gezeigten Abbildung findet man das Folgeverhalten eines Pkws (VISSIM-Fahrzeug mit einem externen Fahrverhalten, welches der Automatisierungsstufe SAE 4 mit einem Folgeabstand von 1,8 Sekunden entsprechen sollte) auf freier Strecke. Vor dem Pkw fährt ein Lkw mit einem ebenfalls extern eingespielten Fahrverhalten (SAE4 mit einem Folgeabstand von 1,8 Sekunden und Geschwindigkeitsbegrenzungen ausgelegt für Lkws). Wie unter Unterabschnitt 3.1.6 beschrieben können diese Fahrzeuge keine Kolonne bilden. Dennoch hat das VISSIM-Fahrzeug anfangs einen Folgeabstand zwischen 0,6 und 0,7 Sekunden (und rund 0,3 Sekunden bei der Annäherung) eingehalten. Nach einer längeren Folgefahrt mit verkürztem Folgeabstand ließ sich das VISSIM-Fahrzeug auf den gewünschten Folgeabstand von 1,8 Sekunden zurückfallen, bevor die Folgefahrt schlussendlich geendet hat.