

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Institut für Verkehrswesen,
Lehrstuhl für Verkehrstechnik

Mikroskopische Modellierung und Bewertung von verkehrssicherheitskritischen Situationen

*am Beispiel kommunikationsbasierter Fahrerwarnungen
auf Autobahnen*

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Silja Hoffmann

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieurfacultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Freudenstein

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Fritz Busch
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Vortisch,
Karlsruher Institut für Technologie

Die Dissertation wurde am 26.04.2013 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Ingenieurfacultät Bau Geo Umwelt am 10.07.2013 angenommen.

Kurzfassung

Die Verkehrswissenschaft strebt danach, Rahmenbedingungen zu schaffen, um den Straßenverkehr sicherer und effizienter zu machen. Nutzenanalysen neuer Maßnahmen ermöglichen die zielorientierte Auswahl und Umsetzung vielversprechender Innovationen. Verkehrssimulationen bieten effiziente Möglichkeiten zur Entwicklungsunterstützung und Wirkungsermittlung. Weitreichende Investitionsentscheidungen können so abgesichert werden. In mikroskopischen Verkehrssimulationen wird das Fahrverhalten in normalen Situationen abgebildet. Für Sondersituationen wie das Umfahren von Hindernissen bestehen jedoch Lücken. Verkehrssicherheitskritische Sondersituationen können bisher in Verkehrssimulationen nicht problemadäquat modelliert werden. Die Wirksamkeit neuer Intelligenter Transportsysteme (ITS) und Fahrerassistenzsysteme (FAS), die gerade diese Situationen adressieren, kann daher in Verkehrssimulationen bisher nicht ausreichend evaluiert werden.

In dieser Arbeit wird ein allgemeingültiger Modellansatz vorgestellt, der simulationsgestützte Analysen des individuellen Fahrverhaltens in kritischen Situationen im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit erlaubt. Dafür wurde das in einer mikroskopischen Verkehrssimulation modellierte Fahrerverhalten in Längs- und Querrichtung modifiziert. Mit Hilfe des entwickelten Ansatzes wird das Fahrerverhalten in kritischen Situationen erfasst und in Verfahren der mikroskopischen Verkehrssimulation integriert. Anhand der Daten realer Fahrer können mit dieser Methode charakteristische Fahrerreaktionen auf nachgebildete Ereignisse identifiziert werden. Die notwendige Datenbasis liefert ein groß angelegter Feldversuch (sim^{TD}), bei dem vielfältige sicherheits- und effizienzsteigernde Funktionen der Fahrzeug-Fahrzeug- und Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation entwickelt wurden.

Für die Validierung des modellierten Fahrerverhaltens in Sondersituationen wurden Kennwerte für den Vergleich zwischen modifizierter Verkehrssimulation und Fahrsimulation hypothesengetrieben definiert. Die statistischen Analysen zeigen die grundsätzliche Übereinstimmung zwischen empirischem Datensatz und Verkehrssimulation. Verbleibende Abweichungen lassen sich mit der verhältnismäßig geringen Größe der empirischen Basisdaten sowie mit der Beeinflussung des Fahrerverhaltens durch die Verkehrssituation der jeweiligen Untersuchungssituation erklären. Die weitere Validierung und Vervollständigung der Modelle sollte daher anhand umfangreicherer Realdaten im Anschluss an die vorliegende Arbeit durchgeführt werden.

Für zwei Untersuchungsbeispiele wurde exemplarisch eine Wirkungsermittlung durchgeführt. Es zeigt sich, dass gerade durch die zusätzliche Betrachtung von Expositionsdauer und -intensität für verschiedene Kenngrößen, erweiterte Erkenntnisse im Hinblick auf die Verkehrssicherheit erzielt werden können.

Abstract

Transportation Science strives to make road traffic safer and more efficient. Benefit analyses of new measures allow for the objective-oriented selection and implementation of promising innovations. Traffic simulations are effective tools to support development and impact assessment. Extensive investment decisions can be hedged. The driving behavior in normal situations is represented in microscopic traffic simulation. For specific situations such as avoiding obstacles, however, there are gaps. Critical situations for traffic safety cannot be modeled adequately in traffic simulations. The effectiveness of new Intelligent Transportation Systems (ITS) and Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) that address precisely these situations can, therefore, not be evaluated adequately today.

This work describes a modeling approach that allows for simulation-based analyses of individual driving behavior in critical situations in terms of traffic safety. The modeled driver behavior in both the longitudinal and lateral direction was modified in a microscopic traffic simulation. With a newly developed methodology the driver behavior in critical situations can be determined and integrated into the methods of microscopic traffic simulations. Based on data from real drivers, this method can be used to assign characteristic driver reactions to simulated events. The necessary data is provided by a large-scale field test, in which various safety and efficiency enhancing functions of vehicle-to-vehicle and vehicle-to-infrastructure communication were developed.

For the validation of the modeled driver behavior in special situations, characteristic indicators for the comparison between modified traffic simulation and driving simulation were defined. The statistical analyses show the fundamental agreement between empirical data and traffic simulation. Remaining discrepancies can be explained by the relatively small size of the empirical data set and by the influence of individual (or specific) driving situations on driver behavior. A validation should be completed with the extensive data from the field test sim^{TD} following the present work.

For two examples a parameter-based impact assessment was exemplarily performed. This shows that even advanced knowledge in terms of road safety can be achieved by the additional consideration of exposure duration and intensity for various parameters.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
1.1	Thematischer Hintergrund	1
1.2	Motivation	2
1.3	Problemstellung, Zielsetzung und Vorgehensweise	3
2	GRUNDLAGEN FÜR MODELLIERUNG UND BEWERTUNG	6
2.1	Von der Situation zur verkehrssicherheitskritischen Situation – Definitionen	6
2.1.1	Der Situationsbegriff	6
2.1.2	Verkehrssicherheit – was ist sicher, was unsicher?.....	8
2.1.3	Definition einer verkehrssicherheitskritischen Sondersituation.....	11
2.1.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	12
2.2	Simulative Wirkungsanalyse von sicherheitsrelevanten ITS	13
2.2.1	Sicherheitsrelevante ITS.....	14
2.2.2	Was ist der Nutzen einer modifizierten Verkehrssimulation?.....	14
2.2.3	Verkehrssicherheit – kann sie simuliert werden?.....	16
2.2.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	17
2.3	Wirkungsanalyse unter Aspekten der Verkehrssicherheit	19
2.3.1	Unfallgeschehen	19
2.3.2	Verkehrssicherheit – Untersuchungsansätze	23
2.3.3	Kenngößen	27
2.3.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	40
2.4	Fahrermodellierung – Bestehende Modelle und ihre Eignung.....	41
2.4.1	Verhaltensmodelle	43
2.4.2	Modellierung in Längsrichtung.....	46
2.4.3	Modellierung in Querrichtung.....	51
2.4.4	Mikroskopische Verkehrssimulationswerkzeuge	53
2.4.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	56
2.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	57
3	MODELLBILDUNG	59
3.1	Modellierungsansatz.....	59
3.1.1	Modellidee.....	59
3.1.2	Basisdaten für die Modellierung.....	60
3.1.3	Vorgehen	63
3.2	Untersuchungssituationen und Anwendungsbeispiele	66
3.2.1	Allgemeines	66
3.2.2	Anwendungsbeispiele	67

3.2.3	Untersuchungskonzepte und Modellierung der Untersuchungssituationen .	68
3.3	Modellierung des Fahrerverhaltens.....	71
3.3.1	Annahmen für potenzielle Fahrerreaktionen	71
3.3.2	Aufbereitung und Analyse der Eingangsdaten.....	73
3.3.3	Modellierung des Verhaltens in Längsrichtung	83
3.3.4	Modellierung des Verhaltens in Querrichtung	88
3.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	89
4	MODELLANWENDUNG UND BEWERTUNG	90
4.1	Durchführung der Verkehrssimulationen.....	90
4.1.1	Verwendete Parameter	90
4.1.2	Auswahl des Auswertungsbereichs	90
4.1.3	Notwendige Anzahl an Simulationsdurchläufen.....	92
4.2	Validierung der Verkehrssimulation	93
4.2.1	Visuelle Validierung.....	94
4.2.2	Fehlerquadrate und mittlerer Fehler.....	99
4.2.3	Regressionsanalyse	101
4.2.4	Zusammenfassende Validierung.....	102
4.3	Wirkungsanalyse und Bewertung hinsichtlich Verkehrssicherheit	104
4.3.1	Geschwindigkeitsbezogene Kenngrößen.....	104
4.3.2	Beschleunigungsbezogenen Kenngrößen	106
4.3.3	Abstandsbezogene Kenngrößen.....	114
4.3.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	122
5	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	125
6	Literaturverzeichnis.....	130
	Abkürzungsverzeichnis	139
	Abbildungsverzeichnis	141
	Tabellenverzeichnis	145
	Anhang.....	147

1 EINLEITUNG

Schafft die detaillierte Abbildung des individuellen Fahrerverhaltens in verkehrssicherheitsrelevanten Sondersituation (z. B. Umfahrung eines Hindernisses) einen Mehrwert für Wirkungsanalysen mit Verkehrssimulationen? Neben der Beantwortung dieser Frage ist das Ziel dieser Arbeit, eine Methode aufzuzeigen, wie zukünftig eine simulative Analyse der Wirkungen von intelligenten Verkehrssystemen mit erhöhter Aussagekraft der Ergebnisse ermöglicht werden kann.

Die Abschnitte 1.1 und 1.2 stellen den thematischen Hintergrund und die Motivation der vorliegenden Arbeit dar. In Abschnitt 1.3 wird die Problemstellung konkretisiert, die in die Zielsetzung, Vorgehensweise und Struktur der Arbeit mündet.

1.1 Thematischer Hintergrund

Menschen handeln nicht immer objektiv sinnvoll und richtig. Menschliches Fehlverhalten bzw. nicht konformes Verhalten im Straßenverkehr führt zu sicherheitskritischen Verkehrssituationen, Verkehrsunfällen sowie inhomogenen Verkehrsabläufen und Stau. Oft ist es nicht ein eklatanter Fehler, sondern vielleicht nur ein kurzzeitig zu dichtes Auffahren und zu starkes Bremsen, eine kleine Unaufmerksamkeit, die der Fahrer selbst gar nicht bemerkt, die aber für den nachfolgenden Verkehr Staus und sicherheitskritische Situationen verursacht.

Die Verkehrswissenschaften streben in ihren verschiedenen Fachdisziplinen danach, Maßnahmen und Rahmenbedingungen zu schaffen, die den Straßenverkehr sicher und staufrei abwickeln. Neben der Maßnahmenentwicklung sind der Test und die Abschätzung der Maßnahmenwirkung ein wichtiger Aspekt. Die anschauliche und valide Ermittlung der Potenziale einer neuen Technik oder Maßnahme unterstützt und ermöglicht die zielorientierte Auswahl und Umsetzung vielversprechender Innovationen. Weitreichende Investitionsentscheidungen müssen durch Informationen über ihre zukünftigen Wirkungen abgesichert werden. Wirkungen neuer Maßnahmen auf das Verkehrssystem u. a. hinsichtlich Verkehrssicherheit und Verkehrseffizienz sind vorab zu ermitteln.

Versuche im realen Umfeld sind häufig kostenintensiv oder zeigen mit finanzierbaren Prototypen oder Vorversuchen geringe nachweisbare Wirkungen auf das Gesamtsystem. Zusätzlich können die Potenziale einer Maßnahme im realen Umfeld oft nicht eindeutig, umfassend und vergleichbar nachgewiesen werden, bedingt durch nicht beeinflussbare und in ihrer Komplexität nicht handhabbar erfassbare äußere Randbedingungen.

Neue Technologien der Informationsgenerierung, -aufbereitung und -übertragung ermöglichen z. B. die flächendeckende Ausstattung von Fahrzeugen und Infrastruktur mit Telematik und Fahrerassistenzsystemen. Die Entscheidungen zur Funktionsgestaltung, -auswahl und Investition sind weitreichender als bisher und müssen durch Potenzial- und Nutzen-Kosten-

Analysen unterstützt werden. Der Untersuchungsraum ist nicht mehr örtlich begrenzt (wie z. B. bei einer baulichen Neugestaltung eines Unfallschwerpunkts). Es handelt sich zunehmend um großräumige Betrachtungen. Einfaches Ausprobieren und im Anschluss die Ergebnisse im Vorher-Nachher-Vergleich zu messen, funktioniert in diesem Zusammenhang nicht, die Investitionssumme ist hoch – man muss daher vorher wissen, ob sich die Investition lohnt.

Untersuchungen zu Wirkungen auf die Verkehrssicherheit zielen bisher häufig auf die Ermittlung von Anzahl und Ausmaß von Unfällen vor Einführung und Vergleich mit Unfallanzahl und -ausmaß nach Einführung. Oft werden auch Unfalldaten aus der Vergangenheit analysiert, um auf zukünftige Potenziale in der Unfallvermeidung zu schließen. Unfälle sind jedoch vergleichsweise seltene Ereignisse. Unfallrückgänge in der Unfallstatistik einer einzelnen umgesetzten Maßnahme zuzuordnen ist meist nicht möglich.

Untersuchungsmöglichkeiten zur Wirkungsabschätzung sind vielfältig und bieten in der Regel mit zunehmendem Aufwand zuverlässigere Aussagen. Die Datenverfügbarkeit und deren Detaillierungsgrad beeinflussen zusätzlich die Prognosegüte. Simulationsmodelle sind gängige und kosteneffiziente Mittel zur Entwicklungsunterstützung und Wirkungsermittlung. Simulationen haben den Vorteil, dass einzelne Modellparameter *ceteris paribus* (c.p.) verändert und Wirkungen unter sonst identischen Randbedingungen ermittelt und miteinander verglichen werden können. Es können die vorhandenen stochastischen Komponenten des Verkehrsablaufs, die die Wirksamkeit von neuen verkehrlichen Maßnahmen beeinflussen (z. B. Schwankungen der Verkehrsnachfrage, Störungen oder auch das Zusammentreffen verschiedener Fahrertypen und Fahrerzustände), mit den Mitteln der Stochastischen Simulation abgebildet werden.

Simulativ ermittelte Ergebnisse sind abhängig vom zugrundeliegenden Modell und der dort getroffenen Abstraktion der Wirklichkeit. Die Einflussfaktoren und Zusammenhänge im Straßenverkehr sind komplex. Bei der Modellbildung wird zwangsläufig hinsichtlich des Modellziels abstrahiert, um die Komplexität handhabbar zu gestalten. Es ist daher besonders wichtig, die zentralen Größen und Parameter des Untersuchungssystems zu identifizieren und von den nebensächlichen zu unterscheiden.

1.2 Motivation

Das Fahrerverhalten in normalen Situationen wird in der mikroskopischen Verkehrssimulation abgebildet, für Sondersituationen z. B. das Umfahren von Hindernissen oder auch die Einflüsse durch die Nutzung intelligenter Transportsysteme bestehen jedoch Lücken. Verkehrssicherheitskritische Sondersituationen können in Verkehrssimulationen noch nicht problemadäquat modelliert werden. Die Wirksamkeit neuer intelligenter Transportsysteme (ITS) und Fahrerassistenzsysteme (FAS), die gerade diese Situationen adressieren, kann daher in der Verkehrssimulation nicht ausreichend evaluiert werden.

Fehlverhalten der Fahrzeugführer ist mit Abstand die häufigste Unfallursache [STATISTISCHES BUNDESAMT, 2011]. ITS und FAS unterstützen den Fahrer sowohl infrastruktur- als auch fahrzeugseitig in der Erkennung und Einschätzung sicherheitskritischer Situationen und zielen dadurch auf eine Verringerung der fahrerbezogenen Unfälle. Unterstützt durch moderne Technologien erhält der Fahrer eine weitere Voraussicht und damit eine frühzeitige Reaktionsmöglichkeit auf unfallträchtige Ereignisse.

Wenn die tatsächliche Wirkung von ITS und FAS auf die Verkehrssicherheit mittels Verkehrssimulationen abgeschätzt werden kann, hat dies einen entscheidenden ökonomischen Nutzen.

Es stellt sich deshalb die Frage: Können bisherige Verkehrssimulationen genutzt werden, um insbesondere verkehrssicherheitsrelevante Aussagen zu ermöglichen? Und wenn ja, können z. B. Sicherheitszugewinne durch Fahrerwarnungen in Verkehrssimulationen ermittelt werden und was ist der Erkenntnisgewinn bei der Untersuchung mit Verkehrssimulationen statt z. B. mit Fahrsimulationen?

Groß angelegte Versuche wie z. B. sim^{TD} [www.simTD.de] bieten die Chance neu verfügbare Versuchsdaten und zusätzliche Erkenntnisse in die Verkehrssimulation zu integrieren. Die Integration des individuellen Fahrerverhaltens, über das man detaillierte Kenntnisse z. B. aus der Fahrsimulation gewinnen kann, kann daher einen Mehrwert für die Modellierung von verkehrssicherheitskritischen Sondersituationen in Verkehrssimulationen liefern.

1.3 Problemstellung, Zielsetzung und Vorgehensweise

Die übergeordnete Fragestellung der vorliegenden Arbeit lautet: Schafft die durch Nachbildung des individuellen Fahrerverhaltens modifizierte Verkehrssimulation einer verkehrssicherheitskritischen Situation einen Mehrwert für die simulative Wirkungsanalyse von intelligenten Verkehrssystemen? Neben der Beantwortung dieser Frage ist das Ziel, eine Methode aufzuzeigen, wie zukünftig eine simulative Analyse der Wirkungen von intelligenten Verkehrssystemen mit erhöhter Validität der Ergebnisse ermöglicht werden kann.

Ein Mehrwert ist dann erreicht, wenn die modifizierte Verkehrssimulation eine größere statistische Übereinstimmung mit der Realität aufweist, als die ursprüngliche Version - bzw. mit den Daten, die Aufschluss über das Fahrerverhalten unter realen Bedingungen geben. Diese können beispielsweise in Form von geeigneten Messungen im Straßennetz oder auch in der Fahrsimulation erhoben werden. Für die Messung des Mehrwerts ist es notwendig, geeignete Kenngrößen zu identifizieren und anhand dieser Kennzahlen die Simulation mit realen Daten zu vergleichen.

In diesem Zusammenhang wird vorab erläutert, was genau mit „verkehrssicherheitskritischer Sondersituation“ gemeint ist (→ Abschnitt 2.1), warum solch eine Eingrenzung vorgenommen wird und worin die derzeitigen Defizite in der Modellierung solcher Situationen in der

Verkehrssimulation liegen. Es wird ebenso gezeigt, worin der Erkenntnisgewinn in der Betrachtung solch verkehrssicherheitsrelevanter Sondersituationen in Verkehrssimulationen liegt - verglichen mit der Betrachtung in anderen gängigen Versuchsumgebungen z. B. im realen Versuch oder im Vergleich zu einer Fahrsimulation (→ Abschnitt 2.2 und Abschnitt 2.3).

Weiterhin liegen wichtige Bestandteile dieser Arbeit in der Analyse bestehender Modelle zur Fahrermodellierung und deren Eignung zur Wirkungsanalyse von Fahrerassistenzsystemen (→ Abschnitt 2.4). Ebenso wird eine Recherche und Diskussion möglicher Bewertungsansätze für die Verkehrssicherheit (→ Abschnitt 2.3.2) und geeigneter Kenngrößen zur Beschreibung von Verkehr und Fahrerverhalten (→ Abschnitt 2.3.3) durchgeführt. Soll Verkehrssicherheit anhand von Mikrosimulationen bewertet werden, so liegt ein Faktor für die Aussagekraft dieser Kenngrößen in der Möglichkeit, Fahrerverhalten detailliert, repräsentativ und akkurat abzubilden.

Die Zusammenstellung verkehrstechnischer Kenngrößen (→ Abschnitt 2.3.3) ist Basis für verschiedene Aspekte im Prozess der Modifizierung einer Verkehrssimulation. Die verkehrstechnischen Kenngrößen finden Verwendung als:

- Eingangsgrößen in die Verkehrssimulation (z. B. aus der Fahrsimulation oder aus Fahrversuchen im realen Straßennetz),
- Stellgrößen in gängigen Fahrermodellen,
- Ausgabegrößen aus der Verkehrssimulation für eine verkehrstechnische Wirkungsanalyse
- und Qualitätskenngröße für die Bewertung des umgesetzten Ansatzes.

Zusätzlich werden verschiedene Kenngrößen und statistische Verfahren ausgewählt, um einen Vergleich des Fahrerverhaltens in der modifizierten und nicht modifizierten Verkehrssimulation mit dem neu erhobenen Fahrerverhalten in Sondersituationen durchzuführen.

Aufbauend auf den genannten Recherchen wird anhand ausgewählter Beispiele für verkehrssicherheitskritische Situationen ein Ansatz für die Modifikation von Verkehrssimulationen entwickelt (→ Abschnitt 3), umgesetzt (→ Abschnitt 4.1) und validiert (→ Abschnitt 4.1.3).

Für die Untersuchungsbeispiele wird exemplarisch eine Wirkungsanalyse und Bewertung unter Verwendung der zuvor definierten Kenngrößen mit dem Schwerpunkt auf Verkehrssicherheit durchgeführt. Es ist es nicht Ziel dieser Arbeit, die gewählten Anwendungsbeispiele zu bewerten oder zu hinterfragen. (→ Abschnitt 4.3).

Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung des Vorgehens und der Ergebnisse. Der gewählte Ansatz wird hinsichtlich Aussagekraft und Umsetzbarkeit diskutiert. Im Ausblick werden weiterer Forschungsbedarf bzw. weiterführende Umsetzungs- und Untersuchungsmöglichkeiten zusammengefasst (→ Kapitel 5).

Bild 1-1 gibt einen Überblick über die Struktur der vorliegenden Arbeit und stellt die jeweiligen Fragestellungen und Inhalte der einzelnen Abschnitte dar:

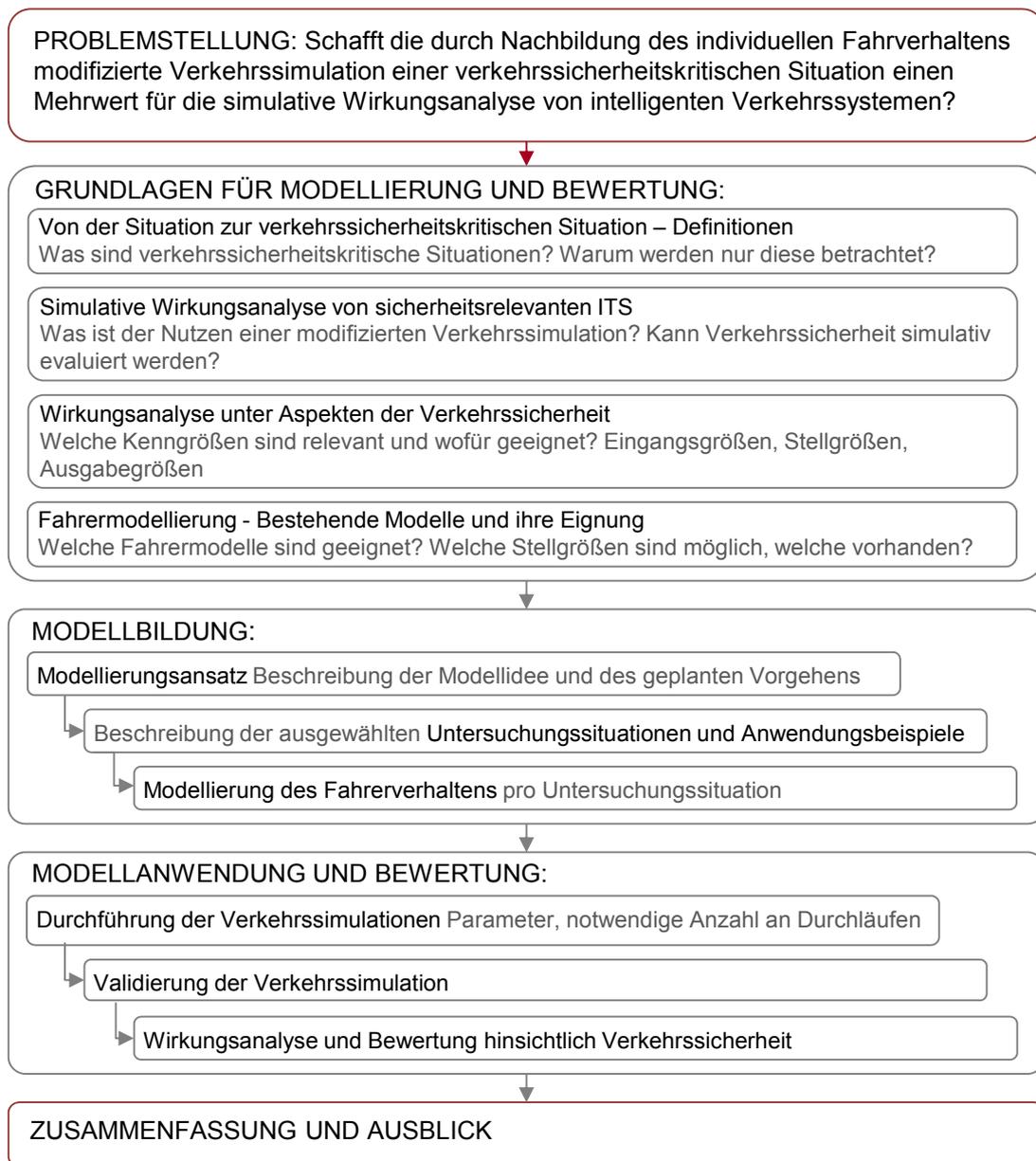


Bild 1-1: Überblick über die Struktur der vorliegenden Arbeit und Darstellung der Fragestellungen der einzelnen Abschnitte

2 GRUNDLAGEN FÜR MODELLIERUNG UND BEWERTUNG

In diesem Abschnitt werden Basisinformationen und Hintergründe zusammentragen, die für die Modellierung von Fahrerverhalten in verkehrssicherheitskritischen Situationen benötigt werden und auch für die darauf aufbauende Wirkungsanalyse relevant sind. Es wird dargelegt, warum die modifizierte Abbildung des Fahrerverhaltens in diesen Situationen in Verkehrssimulationen einen Mehrwert generieren kann und ob Verkehrssimulationen für die Evaluierung von Verkehrssicherheit geeignet sein können. Der Begriff „verkehrssicherheitskritische Sondersituation“ wird basierend auf gängiger Literatur definiert. Für die Wirkungsermittlung von ITS werden relevante Kenngrößen zusammengetragen, kategorisiert und hinsichtlich der Verwendbarkeit in Verkehrssimulationen diskutiert.

Für jeden Teilaspekt dieses Grundlagenabschnitts werden die Rechercheergebnisse zusammengefasst und abschließend werden die erarbeiteten Annahmen und Schlussfolgerungen bzw. die Auswahl der jeweiligen Annahmen/Grundlagen der vorliegenden Arbeit dargestellt.

2.1 Von der Situation zur verkehrssicherheitskritischen Situation – Definitionen

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist nicht die Untersuchung und Modellierung von Fahrerverhalten für alle Fahrsituationen, sondern ausschließlich die Betrachtung der Bewertung und Modellierung von Fahrerverhalten in verkehrssicherheitskritischen Sondersituationen. In diesem Abschnitt werden Definitionen des Begriffs Situation (dessen zeitliche und räumliche Dimensionen) diskutiert und zum Untersuchungsgegenstand stimmige Begriffe für den weiteren Verlauf der Arbeit ausgewählt. Darauf aufbauend wird die Eingrenzung des Situationsbegriffs auf verkehrssicherheitskritische Sondersituationen definiert.

2.1.1 Der Situationsbegriff

Es gibt keine allgemeingültige Definition für den Begriff „Situation“ hinsichtlich der vorliegenden Fragestellung in einem verkehrswissenschaftlichen Zusammenhang. Auch für die Grenze zwischen zwei Situationen findet sich keine eindeutige Definition. Wichtige Aspekte bei der Betrachtung des Begriffs „Situation“ sind unter anderem die räumliche und zeitliche Ausdehnung einer Situation und auch die Perspektive, vgl. [FASTENMEIER 1994, 1995]. Beschreibt die Situation beispielsweise objektiv gegebene und messbare räumliche und zeitliche Zusammenhänge in der Umgebung eines Verkehrsteilnehmers oder bezieht sich die Situation auf den subjektiv vom Verkehrsteilnehmer wahrgenommenen Teil des Umfelds?

Objektive Beschreibungen von Situationen nach räumlichen Gegebenheiten orientieren sich meist an verkehrstechnischen Einrichtungen wie z. B. Knotenpunkt, freie Strecke oder Autobahn, und dem Wechsel zwischen diesen während der Fahrt. Die genaue Beschreibung der

Situation unterscheidet sich dann nach verschiedenen Charakteristika, wie z. B. bei FASTENMEIER [1994, 1995] nach:

- baulichen Gegebenheiten der Verkehrsanlage und ihres Umfeldes (z. B. Knotenpunkt, freie Strecke, Anzahl der Fahrstreifen, Kurvenradius,...),
- betrieblichen Gegebenheiten der Verkehrsanlage und ihres Umfeldes (z. B. Lichtsignalsteuerung, Beschilderungen, Wechselverkehrsanzeigen),
- Merkmalen des Verkehrsablaufs (Verkehrsnachfrage, Verkehrszusammensetzung)
- und weiteren lokalen, spezifischen Gegebenheiten (z. B. Wetter, Veranstaltungen,...).

Allerdings sind unter anderem nach FASTENMEIER [1994, 1995] solche „verkehrstechnischen Beschreibungen“ der objektiven Verkehrsbedingungen für eine Analyse situationsbezogenen Verhaltens nicht ausreichend:

„Dies zeigt schon die Tatsache, dass unterschiedliche Verkehrsanlagentypen ähnliche Verhaltensmuster beim Fahrer erzeugen können und andererseits gleichartige technisch-bauliche Gegebenheiten zu unterschiedlichen Reaktions- und Beanspruchungsmustern führen können.“

FASTENMEIER [1994, 1995] definiert den Begriff der Verkehrssituation basierend auf [V. BENDA, 1972] als "Umgebung des Mensch-Maschine-Systems (MMS) Fahrer-Fahrzeug aus Fahrersicht". Eine Verkehrssituation ist demnach ein begrenzter Ausschnitt aus dem Verkehrsgeschehen aus der Perspektive des Fahrers, der die Verkehrssituation in ihrer zeitlichen und räumlichen Begrenzung erfährt. Änderungen in der Umgebung der Fahrer-Fahrzeug-Einheiten durch die Fahrt bedingt bzw. durch Änderungen, die in der Infrastruktur liegen werden als Grenze zwischen zwei Situationen verstanden. Diese Definition "aus Fahrersicht" orientiert sich an verkehrstechnischen und baulichen Merkmalen der Situation und stellt zusätzlich die subjektive Perspektive des Fahrers und seiner Fahrt in den Mittelpunkt.

WIEDEMANN [1974] zitiert das Situations-Aktions Modell (Bild 2-1) nach Büschges et al. Demnach kann die Grenze zwischen zwei Situationen gezogen werden „nach dem Vorhandensein möglicher Handlungsalternativen, die unterschiedliche Folgesituationen erzeugen können“.

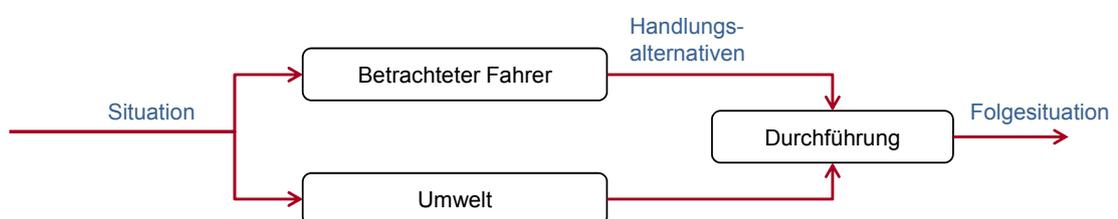


Bild 2-1: Situations-Aktions Modell nach Büschges et al., 1972 [zitiert nach WIEDEMANN 1974, S. 9]

Die zitierte Studie von Büschges et al. bezeichnet unter „Umwelt“ alle straßen- und fahrzeugbedingten Faktoren sowie alle Verkehrsteilnehmer, die sich im Einflussbereich befinden.

Die Unterscheidung von objektiven und subjektiven Aspekten des Situationsbegriffs ist für die vorliegende Fragestellung vorteilhaft. So kann zwischen der objektiv gegebenen Situation und subjektiv wahrgenommenen Teilen der Situation unterschieden werden, da gerade die Verschiedenheit zwischen beiden das Verhalten der Verkehrsteilnehmer maßgeblich beeinflusst.

REICHART [2001] unterscheidet zwischen *Verkehrssituation*, *Fahrsituation* und *Fahrersituation*: Als *Verkehrssituation* bezeichnet er „die objektiv gegebene räumliche und zeitliche Konstellation der verkehrsbezogenen Einflussgrößen der Arbeitsumgebung“ der Verkehrsteilnehmer“. Dies beinhaltet auch Faktoren, die der Fahrer (noch) nicht wahrnehmen kann. Die *Fahrsituation* ist der aus Fahrersicht prinzipiell wahrnehmbare Teil der Verkehrssituation. Die *Fahrersituation* ist die vom Fahrer tatsächlich wahrgenommene Situation. Sie wird von physischen, psychischen Eigenschaften und Handlungsabsichten (u. a. Sehvermögen, Erfahrung,...) des Fahrers beeinflusst. Die Grenze zwischen zwei Situationen ist durch die Änderung einer situationsrelevanten Größe der Umgebung bedingt.

2.1.2 Verkehrssicherheit – was ist sicher, was unsicher?

Wie kann nun eine Kategorisierung der Situation in sichere und unsichere Situationen erfolgen? Zur Beschreibung von Sicherheit und Unsicherheit gibt es viele verwendbare Begriffe. Im Nachfolgenden werden verschiedene Begriffe vorgestellt und für die weitere Verwendung in der vorliegenden Arbeit definiert und kategorisiert.

Der Begriff „*sicher*“ schließt das Unfallereignis aus, das de facto unsicher ist, da dem Unfall eine unsichere Situation vorausgegangen sein muss. Eine unfallfreie Verkehrssituation muss aber trotzdem nicht gleich sicher sein. In einer sicheren Situation besteht keine Gefahr.

„*Gefahr: Möglichkeit, dass jemandem etwas zustößt, dass ein Schaden eintritt; drohendes Unheil*“ [DUDEN, 2012].

Eine detailliertere Definition für den Begriff Gefahr liefert das BAYERISCHE LANDESAMT FÜR UMWELT [2010]:

„*Gefahr ist definitionsgemäß ein Zustand oder Vorgang, aus dem Schaden für Personen und/oder für Sachgüter entstehen kann. Der Begriff bezeichnet eine Bedrohung durch ein zukünftiges Schadensereignis, das unter bestimmten Bedingungen eintreten kann.*“

Demnach ist eine Situation *gefährlich*, wenn die Möglichkeit zu negativen Auswirkungen besteht. Eine negative Auswirkung der gefährlichen Situation kann in menschlichen Verletzungen oder materieller Beschädigung bestehen (siehe u. a. [ARCHER, 2005]). Solche Situationen sind *unsicher*.

„*Der Begriff „Gefährdung“, der in der englischen Literatur mit „Hazard“ übersetzt wird, bezieht sich ganz konkret auf eine bestimmte Situation oder ein bestimmtes Objekt und beschreibt*

die Wahrscheinlichkeit mit der eine potenzielle Gefahr zeitlich oder räumlich auftritt.“
[BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2010]

In der wirtschaftswissenschaftlichen Entscheidungstheorie wird von *Unsicherheit* gesprochen, wenn Entscheidungen getroffen werden, bei denen der wahre „Umweltzustand“ nicht bekannt ist und eine Handlung ohne Kenntnis aller notwendigen Randbedingungen ausgeführt wird. Bei Entscheidungen unter Unsicherheit wird zusätzlich unterschieden in Entscheidungen unter *Risiko*, bei denen die Wahrscheinlichkeit für die möglicherweise eintretenden Umweltsituationen bekannt ist.

„Risiko: möglicher negativer Ausgang bei einer Unternehmung, mit dem Nachteile, Verlust, Schäden verbunden sind; mit einem Vorhaben, Unternehmen o. Ä. verbundenes Wagnis.“
[DUDEN, 2012]

„Im allgemeinen Sinne versteht man unter Risiko die Wahrscheinlichkeit, mit der aus einem Zustand oder Vorgang ein Ereignis mit negativer Wirkung -ein Schaden- entstehen kann. Im engeren Sinne gibt das Risiko die qualitative und quantitative Charakterisierung eines möglichen Schadens an. Es beschreibt insbesondere die Tragweite der Schadenswirkung und kann durch das Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß beziffert werden. [...] Ein risikofreier Zustand ist generell nicht erreichbar. Ein Zustand wird aber bereits dann als sicher bezeichnet, wenn alle bestehenden Risiken unter einem vertretbaren/ akzeptierbaren Grenzkrisiko liegen. [...] Ein Restrisiko, das die Gefährdung nach Realisierung aller als erforderlich erachteten Sicherungsmaßnahmen bemisst, ist dennoch immer gegeben.“
[BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2010]

Makroskopisch und objektiv betrachtet, bezeichnet das *Unfallrisiko*: die Anzahl an Unfällen und deren Folgen in Relation zu einer Kenngröße der Ausgesetzttheit (z. B. Fahrzeug-km) oder einer Kenngröße des Personenkreises (z. B. weiblicher/männlicher Fahrer, junger Fahrer, älterer Fahrer), siehe u. a. [ARCHER, 2005]. Aus der mikroskopischen, individuellen Perspektive ist ein hohes Unfallrisiko ein meist nicht mit den makroskopisch objektiven Kenngrößen vergleichbarer Wert, der von Person zu Person und auch in unterschiedlichen Situationen variiert. Das individuelle Unfallrisiko wird in der vorliegenden Arbeit als ein relativer Wert definiert, der Aussagen über ein vergleichsweise höheres bzw. niedrigeres Risiko ermöglicht. Je kritischer und unfalldrohender die Situation - je unsicherer - desto höher ist auch das Unfallrisiko. Dies ist teilweise quantitativ nicht erfassbar.

Oft wird bei der Beschreibung der Verkehrssicherheit vom Kontinuum des Verkehrsverhaltens vom Normalverhalten bis zum Unfall ausgegangen (vgl. unter anderem: KLEBELSBERG [1982], ARCHER [2005]). Zwischen den beiden Extremen „Normalverhalten“ und „Unfall“ zeigen sich Verhaltensauffälligkeiten, die nicht zwangsläufig zum Unfall führen: Verhaltensfehler, Fahrfehler, Verkehrsverstöße, Verkehrskonflikte und Beinahe-Unfälle. Diese werden nachfolgend in Anlehnung an KLEBELSBERG [1982] erläutert:

Fahrfehler sind Abweichungen vom Normalverhalten. Nicht jeder Fahrfehler ist aber zugleich ein Verkehrsverstoß.

Verkehrsverstöße sind schwerwiegendere Fahrfehler, die zusätzlich die Straßenverkehrsordnung verletzen. Verkehrsverstöße finden im Gegensatz zu Unfällen sehr häufig statt, aber nicht jeder Verkehrsverstoß wird erkannt und geahndet.

Im Allgemeinen wird bei *Verkehrskonflikten* von voneinander entgegen gerichteten Verhaltenstendenzen von Verkehrsteilnehmern ausgegangen, die bei Einhaltung der Verkehrsregeln nicht stattfinden würden und die bei Beibehaltung des Verhaltens zu einem Unfall führen. Demnach ist eine Gefahr vorhanden, mit steigender Gefährdung wird vom Zustand des „Beinahe-Unfalls“ ausgegangen.

Beinahe-Unfälle und *Verkehrskonflikte* können gleichbedeutend sein. Je nach Literaturquelle, werden diese beiden Formen häufig nicht unterschieden. Ein aus Sicht der Verfasserin sinnvolles Abgrenzungsmerkmal ist ein höherer Gefährlichkeitsgrad als bei einem Verkehrskonflikt. Die Situationen bei „Beinahe-Unfällen“ sind kritischer, der Unfall ist drohender. Zusätzlich beinhalten „Beinahe-Unfälle“ auch die Situationen vor dem Alleinunfall – im Gegensatz zum Verkehrskonflikt, der immer im Zusammenhang mit mindestens zwei Verkehrsteilnehmern steht.

Für die Verwendung der Begriffe sicher und unsicher zeigt sich aus Sicht der Verfasserin, dass die Grenzen zwischen „sicher“ und „unsicher“ fließend, subjektiv und variabel sind. Das individuelle Verständnis von Gefahr und Unsicherheit variiert nicht nur von Person zu Person, sondern auch von Situation zu Situation.

Eine eigene Sortierung und relationale Darstellung der zuvor genannten Begriffe und deren Verwendung in der vorliegenden Arbeit ist in Bild 2-2 dargestellt:

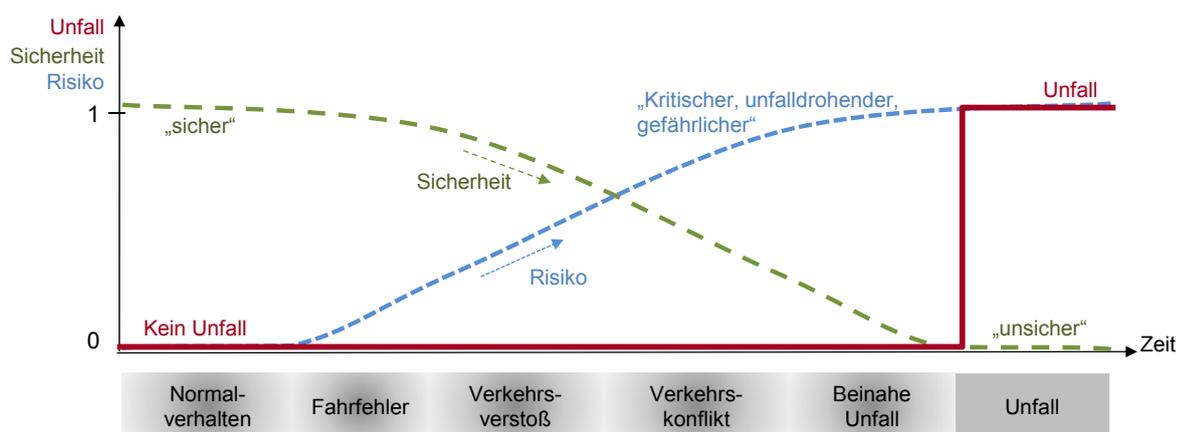


Bild 2-2: Relationale Darstellung der verwendeten Begriffe zur Beschreibung von Verkehrssicherheit und -unsicherheit

2.1.3 Definition einer verkehrssicherheitskritischen Sondersituation

In der vorliegenden Arbeit wird der Schwerpunkt auf die Betrachtung verkehrssicherheitskritischer Situationen und deren Modellierung in Verkehrssimulationen gelegt. Die Modellierung des Fahr- und Fahrerverhaltens in „normalen“ Situationen ist bereits Gegenstand einer Vielzahl wissenschaftlicher Arbeiten gewesen. Gängige Verkehrssimulationen ermöglichen die Modellierung der u. a. durch WIEDEMANN [1974] bezeichneten zwei grundsätzlichen Situationstypen (vgl. Bild 2-3) von

- unbeeinflusstem Fahren und
- beeinflusstem Fahren.

Beim unbeeinflussten Fahren wird das Fahrerverhalten lediglich durch Eigenschaften der Straße, des Fahrzeugs und der Verkehrsordnung beeinflusst. Wird das Fahrerverhalten zusätzlich durch andere Verkehrsteilnehmer beeinträchtigt, liegt nach WIEDEMANN [1974] beeinflusstes Fahren vor.

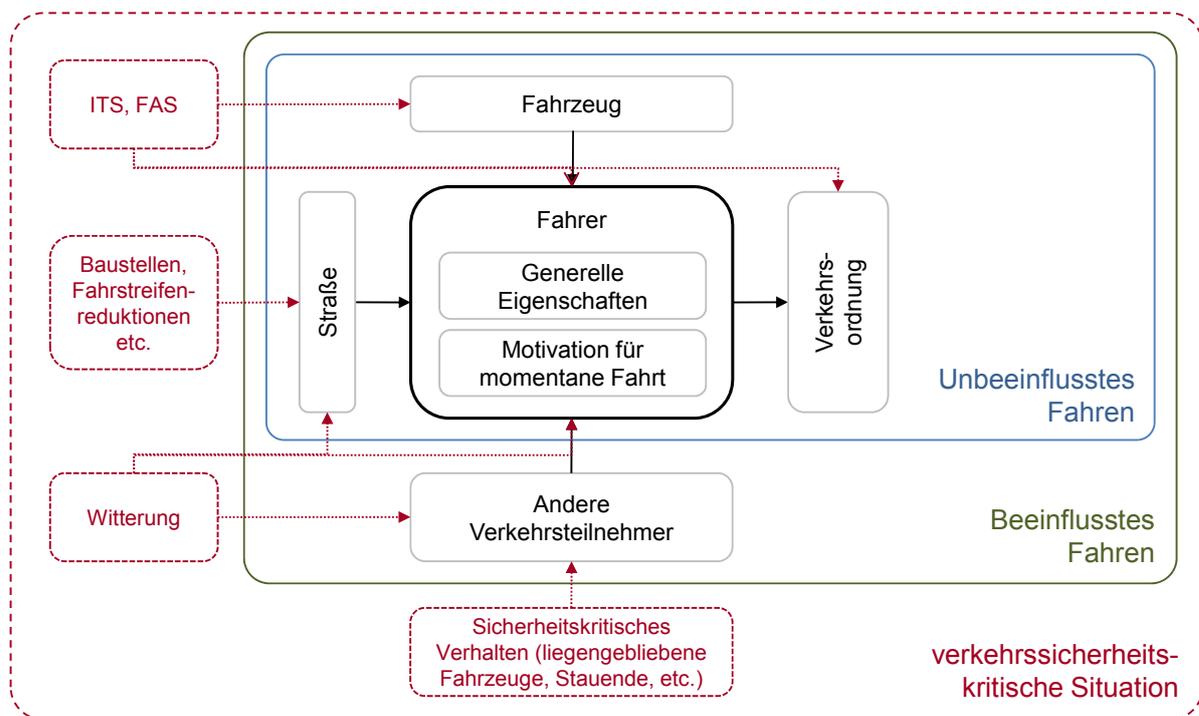


Bild 2-3: Unbeeinflusstes und beeinflusstes Fahren, Darstellung nach WIEDEMANN [1974], und eigene Erweiterung um den Aspekt der verkehrssicherheitskritischen Situation (gestrichelt)

Darauf aufbauend wird die verkehrssicherheitskritische Sondersituation im Rahmen der vorliegenden Arbeit folgendermaßen definiert:

Der Begriff *verkehrssicherheitskritische Sondersituation* umfasst Situationen, die in der Regel von ITS und FAS adressiert werden, also Situationen, die im Allgemeinen als warnwürdig und gefährlich verstanden werden. Diese Situationen können als eine Unterkategorie des

beeinflussten Fahrens verstanden werden. Andere Verkehrsteilnehmer, z. B. liegengebliebenen Fahrzeuge, gefährliche Stauenden und auch weitere äußere Einflüsse, wie z. B. Baustellen, Fahrstreifenreduktionen, beeinflussen für eingrenzbar Zeit- oder Streckenabschnitte das Fahrerverhalten. Die anderen Verkehrsteilnehmer stellen wiederum dasselbe Betrachtungsschema dar und sind ebenso durch die gleichen Faktoren in ihrem Fahrerverhalten beeinflusst. Je nach Zusammentreffen dieser Faktoren entstehen Verkehrskonflikte und Beinahe-Unfälle.

Die realistische Modellierung dieser spezifischen Situationen ist mit den Standardeinstellungen gängiger Verkehrssimulatoren meist nicht möglich – unter anderem, weil meist die Kenntnis über das Fahrerverhalten in solchen Situationen nicht vorhanden ist. Dies liegt daran, dass die Modellierung solcher Situationen bisher nur sehr selten Anwendung in Verkehrssimulationen erfahren hat, weil diese Fragen häufig auch nicht im Fokus der meisten Anwender liegen.

Beginn und Ende der verkehrssicherheitskritischen Sondersituation sind demnach in Anlehnung an die Situationsbegriffe von REICHART [2001]:

Aus Betrachtung der *Verkehrssituation*: der Beginn bzw. das Ende der externen Einflussgröße, z. B.: ein Fahrzeug bleibt liegen bzw. wird entfernt oder fährt weiter; ein Stauende baut sich auf bzw. das Stauende ist abgebaut; eine Baustelle wird eingerichtet bzw. entfernt.

Aus Betrachtung der *Fahrsituation*: der Beginn ist dadurch gekennzeichnet, dass der Fahrer theoretisch von der jeweiligen Situation Kenntnis nehmen könnte, er also z. B. das liegengebliebene Fahrzeug, das Stauende oder die Baustelle wahrnehmen könnte, auch durch Unterstützung durch das FAS. Das Ende ist erreicht, nachdem das liegengebliebene Fahrzeug, das Stauende oder die Baustelle passiert wurden.

Die Betrachtung der *Fahrersituation* berücksichtigt den tatsächlichen Kenntnisstand des Fahrers, also ob der Fahrer das jeweilige Ereignis auch tatsächlich wahrgenommen hat bzw. ob er wahrgenommen hat, dass er schon im Vorfeld darüber informiert wurde.

2.1.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Verschiedene mögliche Definitionen des Begriffs Situation, sowie dessen zeitliche und räumliche Dimensionen, wurden zusammengestellt und die Eingrenzung des Begriffs für verkehrssicherheitskritische Sondersituationen wurde dargelegt. Weiterhin wurden Begriffe zur Beschreibung der Verkehrssicherheit und insbesondere zur Beschreibung der Grenze zwischen sicheren und unsicheren (= sicherheitskritischen) Verkehrssituationen dargestellt.

In der vorliegenden Arbeit wird die Verwendung verschiedener Situationsbegriffe notwendig. Es wird zwischen objektiven und subjektiven Betrachtungsweisen unterschieden und insbesondere die Unterschiede zwischen beiden. So können eindeutige Beschreibungen für ver-

schiedene Randbedingungen und Voraussetzungen zur Modellierung der Untergruppe „verkehrssicherheitskritischer Sondersituationen“ verwendet werden.

Der Begriff verkehrssicherheitskritische Sondersituation umfasst Situationen, die im Allgemeinen als warnwürdig und gefährlich verstanden werden. Andere Verkehrsteilnehmer und auch weitere äußere Einflüsse, wie z. B. Baustellen, Fahrstreifenreduktionen, beeinflussen für eingrenzbar Zeit- oder Streckenabschnitte das Fahrerverhalten.

Bild 2-4 verdeutlicht die für die vorliegende Arbeit getroffenen Definitionen unterschiedlicher Situationsbegriffe.

Die objektiven Formulierungen, wie Gesamtsituation und Verkehrssituation, des Situationsbegriffs sind notwendig, um die äußeren Randbedingungen und Gegebenheiten zu beschreiben. Die subjektive Betrachtungsweise, die aus verschiedenen Perspektiven Ausschnitte aus der Gesamtsituation berücksichtigt, wie Fahr- und Fahrersituation, ist ebenso notwendig für die vorliegende Fragestellung. Gerade der in der Fahrermodellierung zu berücksichtigenden Aspekt der fahrerspezifisch unterschiedlichen Wahrnehmung der Umwelt, also die unterschiedlichen Lücken zwischen Fahrsituation und Fahrersituation, kann so erfasst werden. Zusätzlich kann so auch die Situation des gewarnten Fahrers eindeutig beschrieben werden. Dabei hat der Fahrer Kenntnis über die in weiterer Zukunft liegende Situation, also eine Fahrersituation, die mehr beinhaltet als die Fahrsituation. Die verkehrssicherheitskritische Sondersituation umfasst einen Sonderfall der Situationsdefinitionen für alle Betrachtungsebenen.

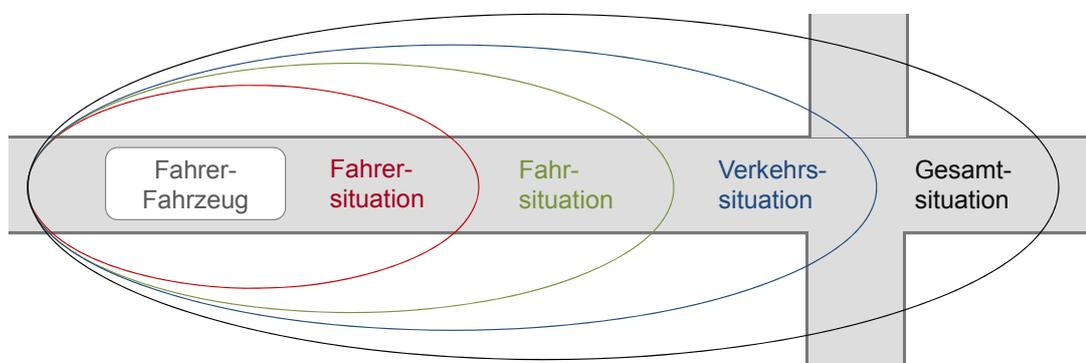


Bild 2-4: Darstellung unterschiedlicher Situationsbegriffe im räumlichen und relationalen Kontext für die Definitionen in der vorliegenden Arbeit

2.2 Simulative Wirkungsanalyse von sicherheitsrelevanten ITS

Dieser Abschnitt soll Antworten auf folgende Fragen geben: Welche Arten von sicherheitsrelevanten Intelligenten Transportsystemen (ITS) und Fahrerassistenzsystemen (FAS) gibt es? Warum sollten intelligente Verkehrssysteme in Verkehrssimulationen untersucht werden? Sind Systeme, die die Verkehrssicherheit beeinflussen, in Verkehrssimulationen abbildbar?

Kann Verkehrssicherheit mit Verkehrssimulationen grundsätzlich evaluiert werden? Was sind dafür die Voraussetzungen?

Hinsichtlich des Untersuchungsgegenstandes gilt für die vorliegende Arbeit die folgende Abgrenzung: Im Mittelpunkt steht die Wirkungsanalyse von informierenden bzw. warnenden Fahrerassistenzsystemen basierend auf der Messung von Fahrzeug- und Verkehrsdaten. Die Untersuchung der Wirkung eingreifender Systeme wäre nach einem ähnlichen Vorgehen möglich, wird im weiteren Verlauf aber nicht behandelt. Die Abschätzung von Wirkpotenzialen basierend auf subjektiv erhobenen Daten durch Nutzerbefragungen ist nicht Gegenstand dieser Arbeit.

2.2.1 Sicherheitsrelevante ITS

Intelligente Transportsysteme (ITS) und Fahrerassistenzsysteme (FAS) unterstützen den Fahrer infrastruktur- oder fahrzeugseitig in der Erkennung und Einschätzung sicherheitskritischer Situationen und zielen dadurch auf eine Verringerung der fahrerbezogenen Unfälle. Unterstützt durch moderne Technologien erhält der Fahrer eine weitere Voraussicht und damit eine frühzeitige Reaktionsmöglichkeit auf unfallträchtige Ereignisse.

Die Information über das Ereignis bzw. - je kritischer die Situation - auch die Warnung vor dem Ereignis oder auch die Beeinflussung des Fahrers, z. B. durch verkehrsrechtlich bindende Verbote und Gebote, kann infrastrukturseitig für das gesamte Fahrzeugkollektiv per Anzeigetafeln oder Streckenbeeinflussungsanlagen erfolgen. Fahrzeugseitig können individualisierte Informationen und Warnungen über sogenannte Human-Maschine-Interfaces (HMI) an den Fahrer kommuniziert werden. Dabei können neben der Visualisierung auch haptische oder akustische Signale ausgegeben werden.

Derzeit wird in vielen Forschungsprojekten erprobt, inwieweit drahtlose lokale Netzwerke (Wireless Local Area Networks, WLAN) für den bidirektionalen Informationsaustausch zwischen den Fahrzeugen (Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation oder Vehicle-to-vehicle-Communication (V2V)) und zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur (Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation oder Vehicle-to-Infrastructure-Communication (V2I)) genutzt werden können, um eine schnelle Information und Warnung der Fahrer zu erzielen. Zudem können dadurch neben der infrastrukturseitigen Datenerfassung auch fahrzeuggenierte Daten, z. B. über starke Bremsungen, Witterung oder Unfall, für die Warnung des nachfolgenden Verkehrs genutzt werden. Entscheidend für die Kommunikationsfähigkeit dieser Systeme und damit auch für deren Wirksamkeit ist die Ausstattungsrate, der Anteil mit dem System ausgestatteter Fahrzeuge am Gesamtverkehr.

2.2.2 Was ist der Nutzen einer modifizierten Verkehrssimulation?

Klassische Versuchsumgebungen für die Erhebung von mikroskopischen Daten über das Fahrerverhalten zur Wirkungsanalyse von Fahrerassistenzsystemen sind:

- realer Verkehr im Straßennetz
 - natürliches Fahrerverhalten
 - angeleitete Versuche
- Testgelände (abgeschlossener Bereich außerhalb des öffentlichen Straßennetzes)
- Fahrsimulation
- Verkehrssimulation

Jede Versuchsumgebung hat ihre Vorteile und aber auch Schwachstellen. Hinsichtlich des Untersuchungsziels sollte zwischen unterschiedlichen Versuchsumgebungen abgewogen werden. So kann jeweils hinsichtlich eines guten Verhältnisses aus Aufwand und Nutzen entschieden werden.

Versuche mit Fahrerassistenzsystemen zur Ermittlung ihrer Wirkung auf den Gesamtverkehr sind im realen Umfeld häufig zu aufwändig, wenn sie die Wirkungen direkt ermittelbar machen sollen. Auch können die Potenziale neuer Systeme im realen Umfeld oft nicht umfassend und vergleichbar nachgewiesen werden. Untersuchungen zu verkehrssicherheitskritischen Systemen sind im realen Verkehr häufig nicht vertretbar, da die Versuchsfahrer und auch andere Verkehrsteilnehmer keinem Risiko ausgesetzt werden können.

Die Beeinträchtigung anderer Verkehrsteilnehmer kann vermieden werden, wenn die Versuche in einem Testgelände, also einem abgeschlossenen Bereich außerhalb des öffentlichen Straßennetzes, durchgeführt werden. Je nach Untersuchungsziel und damit der Auslegung des Versuchs können Aussagen über die technische Funktionalität im realen Fahrzeug und das Fahrerverhalten der Testpersonen getroffen werden.

Weitere gängige und kosteneffizientere Mittel zur Entwicklungsunterstützung und Wirkungsermittlung sind Simulationen. Simulationen haben den Vorteil, dass einzelne Modellparameter verändert und Wirkungen unter sonst identischen Randbedingungen ermittelt und miteinander verglichen werden können (*ceteris paribus* (c. p.)). In der Fahrsimulation kann die Reaktion von unterschiedlichen Versuchsfahrern auf dasselbe System in dergleichen Situation untersucht und verglichen werden. So können die Wirkungen auf den Fahrer im Vergleich mit und ohne System evaluiert werden und die Systeme hinsichtlich verbesserter Nutzerakzeptanz optimiert werden.

Interessiert der Einfluss einer bestimmten Ausstattungsrate mit FAS auf alle Fahrzeuge in einem Verkehrssystem – also z. B. Fragen wie: Ab welcher Ausstattungsrate beeinflussen die Fahrzeuge mit System diejenigen ohne System? – dann ist die Verkehrssimulation ein geeignetes Mittel. Gerade auch die Untersuchung des Einflusses hoher Ausstattungsraten ist möglich, was im realen Verkehrsnetz nur bedingt untersuchbar ist. In der Verkehrssimulation können die vorhandenen stochastischen Komponenten des Verkehrsablaufs abgebildet werden und die Ausstattungsraten beliebig variiert werden.

Hinsichtlich des Wirkungsvergleichs von Fahren mit und ohne System wird im Folgenden von *Fahrsicherheit* bzw. *Fahreffizienz* gesprochen. Als Ausstattungsrate wird der Anteil der

Fahrzeuge mit System bezogen auf alle Fahrzeuge bezeichnet. Eine 20%ige Ausstattungsrate bedeutet, dass jedes fünfte Fahrzeug über das entsprechende FAS verfügt.

Von *Verkehrssicherheit* bzw. *Verkehrseffizienz* wird im Folgenden gesprochen, wenn untersucht wird, welche Ausstattungsrate oder welche Systemalternative welche Wirkung auf das gesamte Fahrzeugkollektiv erzeugt. Bei Verkehrssicherheit und Verkehrseffizienz werden die Ergebnisse aller Fahrzeuge (mit und ohne System) betrachtet (Vgl. auch [SIMTD, 2011]).

Die simulative Wirkungsermittlung in Bezug auf Verkehrseffizienz und -sicherheit ermöglicht nur dann aussagekräftige Ergebnisse, wenn das Verhalten der Fahrer in der jeweiligen Situation in geeigneter Weise abgebildet wird:

„Simulieren heißt nachahmen – nachgeahmt werden kann jedoch grundsätzlich nur bekanntes“ [WIEDEMANN, 1974]

Dafür sind Kenntnisse über die Reaktion des Fahrers auf das Ereignis ohne Fahrerassistenzsysteme, sowie die Reaktion auf eine Warnung bzw. Information durch das Fahrerassistenzsystem notwendig. Diese Reaktionen können unter anderem in der Fahrsimulation (oder im realen Verkehr) ermittelt werden und dann über geeignete Modelle in die Verkehrssimulation integriert werden, um Aussagen über die Wirkung auf den gesamten Verkehr treffen zu können.

2.2.3 Verkehrssicherheit – kann sie simuliert werden?

Untersuchungen zu Wirkungen von FAS auf die Verkehrssicherheit zielen bisher häufig auf die Ermittlung von Anzahl und Ausmaß von Unfällen vor Einführung und Vergleich mit Unfallanzahl und -ausmaß nach Einführung. Oft werden auch Unfalldaten aus der Vergangenheit analysiert, um auf zukünftige Potenziale in der Unfallvermeidung zu schließen. Unfälle sind jedoch vergleichsweise seltene Ereignisse. Es ist meist nicht möglich, Unfallrückgänge in der Unfallstatistik einer einzelnen umgesetzten Maßnahme zuzuordnen. Unfälle sind zu seltene und höchst zufällige Ereignisse, um kurzzeitige simulative Vorher-Nachher-Vergleiche durchzuführen. Gerade auch die daraus resultierenden häufig zu geringen Datenmengen lassen keine statistisch gesicherten Aussagen zu. Daher ist die Nutzung von indirekten Alternativen zur Abschätzung eines sicherheitserhöhenden Potenzials von neuen Systemen notwendig.

Unter anderem GETTMAN & HEAD [2003] beschreiben das große Interesse der Forschung an der Suche nach alternativen Kenngrößen (sog. Surrogate Measures, dt. Ersatzkenngrößen, wie z. B. Time-to-Collision (TTC)), die die Sicherheit eines Systems beschreiben. Sie integrieren eine automatisierte Auswertung von solchen Kenngrößen in Verkehrssimulationen: SSAM (Surrogate Safety Assessment Module). Die meisten dieser Kenngrößen stammen aus der Verkehrskonflikttheorie, diese wird in Abschnitt 2.3 vertieft erläutert. Durch eine hohe Anzahl an Verkehrskonflikten wird auf eine geringe Verkehrssicherheit geschlossen und so eine Potenzialabschätzung ermöglicht.

Voraussetzung für die Verkehrssicherheitsbewertung mit diesen Ersatzkenngrößen ist die Verfügbarkeit detaillierter mikroskopischer Informationen der betreffenden Fahrzeuge. Diese Kenngrößen sind in mikroskopischen Verkehrssimulationen prinzipiell verfügbar. Die meisten der derzeit existierenden mikroskopischen Verkehrssimulationen legen ihren Fokus auf Effizienzuntersuchungen und nutzen Fahrzeugfolge-, Fahrstreifenwechsel- und Zeitlückenakzeptanzmodelle. Diese Modelle basieren meist auf der Grundannahme, dass keine Unfälle und Konflikte stattfinden sollen (Vgl. auch BARCELÓ ET AL. [2002], ARCHER [2005], ARCHER [2000]). Soll Verkehrssicherheit anhand von Mikrosimulationen bewertet werden, so liegt ein wesentlicher Faktor für die Aussagekraft dieser Kenngrößen in der Möglichkeit, die Varianz im Fahrerverhalten detailliert und repräsentativ abzubilden. Dies schließt ebenso „fehlerbehaftete Reaktionen“ mit ein, die standardmäßig so bisher nicht abgebildet werden.

Unter anderem ARCHER [2005] hat Ersatzkenngrößen anhand mikroskopischer Verkehrssimulationen für die Abschätzung der Verkehrssicherheit an Knotenpunkten verwendet und das große Potenzial dieser Vorgehensweise dargestellt.

Bei der unfallbasierten Verkehrssicherheitsbetrachtung ist die Grenze zwischen „sicher“ und „unsicher“ eindeutig definierbar. Die Anzahl reduzierter Unfälle ist ein gut messbarer und monetarisierbarer Wert. Die Verkehrssicherheit ist erhöht, wenn die Zahl der Unfälle zurückgeht. Bei der Verwendung von Ersatzkenngrößen kommt bei deren Interpretation für die Festlegung der Grenze zwischen „sicher“ und „unsicher“ eine wichtige Bedeutung zu.

2.2.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Verkehrssimulationen bieten viele Vorteile bei der Ermittlung von Wirkpotenzialen neuer Systeme und deren Einfluss auf ein Fahrzeugkollektiv. Sie sind zur Analyse von Verkehrseffizienz aber auch Verkehrssicherheit gut geeignet.

Ein Faktor, warum Verkehrssicherheit bisher noch wenig simuliert wird, ist das Fehlen notwendiger Eingangsdaten. Um Verkehrssimulationen für den Untersuchungsschwerpunkt Verkehrssicherheit durchzuführen, ist eine wesentlich bessere Kenntnis über das reale Fahrerverhalten in sicherheitskritischen Situationen erforderlich. Die Modelle müssen entwickelt, kalibriert und validiert werden. Voraussetzungen dafür sind, dass:

- die notwendigen Eingangsdaten vorhanden sind
- und die Simulationsumgebung geeignet ist, die Eingangsdaten und damit das gemessene Fahrerverhalten hinreichend genau abzubilden.

Ist dies erfüllt, dann wird die Bewertung von Verkehrssicherheit mit Hilfe der Verkehrssimulation ermöglicht. Je detaillierter die Eingangsdaten sind und je besser das Modell kalibriert und validiert wird, desto größer ist die Aussagekraft und aber auch der Aufwand. Es bleibt immer die Frage nach der Relation aus Aufwand und Nutzen – gerade auch im Vergleich zu alternativen Methoden. Der Aufbau einer validen Verkehrssimulation zur Beantwortung einer spezifischen Fragestellung bietet zusätzlich die Möglichkeit, weitere Randbedingungen in

dem untersuchten System systematisch zu variieren. So können vergleichsweise einfach zusätzliche Erkenntnisse gewonnen werden, was mit herkömmlichen Methoden der Verkehrssicherheitsbewertung häufig nicht möglich ist.

Sofern man sich ihrer Möglichkeiten und Grenzen bewusst ist, können Verkehrssimulationen einen hohen Erkenntnisgewinn in der Wirkungsanalyse liefern und auch die Funktionsentwicklung unterstützen. Sind gute Informationen über das Fahrerverhalten, z. B. auch aus anderen Versuchsumgebungen, als Eingangsgrößen in die Verkehrssimulation vorhanden und werden aussagekräftige Simulationen und Auswertungen durchgeführt, können Verkehrssimulationen ein wichtiger Teil im Zusammenspiel verschiedener Versuchsumgebungen zur umfassenden Abschätzung des Potenzials neuer Systeme sein.

Die Qualität der Aussagen aus Verkehrssimulationen hängt von der Abbildungsgüte der Eingangswerte ab, d. h. von der Abbildungsgüte des Fahrerverhaltens und des Fahrerassistenzsystems sowie der Auswahl und Abbildungsgüte repräsentativer Verkehrszustände.

Aussagen zum Einfluss neuer Systeme auf die Verkehrssicherheit können so auch unabhängig von Unfallanzahlen getätigt werden. Die meisten Fragestellungen zielen auf die Ermittlung von relativen Unterschieden zwischen verschiedenen Systemalternativen. Die Verwendung von alternativen, mikroskopischen Kenngrößen kann relative Unterschiede zwischen verschiedenen Systemalternativen aufzeigen und damit valide Prognosen über die potenziellen Wirkunterschiede treffen. Es sollten allerdings Wirkungen verglichen werden, die lediglich aus einer Versuchsumgebung stammen. Vergleiche absoluter Werte über verschiedene Versuchsumgebungen hinweg können durch unterschiedliche Charakteristiken der Versuchsumgebungen zu falschen Schlussfolgerungen führen.

Eine Voraussetzung für die Evaluierung von Verkehrssicherheit mit Hilfe der Verkehrssimulation ist, dass die Simulationsumgebung zulässt, dass detaillierte Eingangsgrößen für das Fahr- und Fahrerverhalten in geeigneter Weise abgebildet werden können und dass Modelle und Informationen über das jeweilig relevante Fahrerverhalten vorliegen.

Im Weiteren wird davon ausgegangen, dass über den Vergleich der Ersatzkenngrößen Rückschlüsse über die Änderungen der Verkehrssicherheit getroffen werden können. Meist ist das Ziel des Simulationsexperiments, herauszufinden, ob eine bzw. welche Systemalternative umgesetzt werden sollte. Bei der vergleichenden Analyse kann daher davon ausgegangen werden, dass ein sicherer Indikator für Alternative X verglichen mit einem weniger sicheren Indikator für Alternative Y auch eine höhere Verkehrssicherheit für Alternative X prognostiziert. Dies muss sich aber nicht auch zwangsläufig in niedrigeren Unfallzahlen für Alternative X widerspiegeln.

2.3 Wirkungsanalyse unter Aspekten der Verkehrssicherheit

In dem folgenden Abschnitt werden häufige Unfallarten und das dafür ursächliche Fehlverhalten der Verkehrsteilnehmer beschrieben. Verschiedene Alternativen zu einer Betrachtung von Unfallanzahl und Unfallkosten werden dargestellt. Darauf aufbauend wird ein Beschreibungssystem für die vorliegende Fragestellung abgeleitet. Was führt zu sicherheitskritischen Situationen und wie lassen sich diese Situationen und deren Ursachen systematisch beschreiben? Was ist bei der Modellierung zu berücksichtigen? Im Anschluss werden mögliche Kenngrößen und deren Eigenschaften erläutert. Es wird eine Abschätzung hinsichtlich ihrer Eignung als Eingangsgröße, Stellgröße oder Ausgangsgröße für die Modellbildung getroffen.

2.3.1 Unfallgeschehen

Für die Entwicklung von ITS und für die Modellierung von verkehrssicherheitskritischen Situationen müssen die fehleranfälligen Aspekte im System erkannt werden, um diesen entsprechend durch technische Unterstützung vorzubeugen bzw. diese in den Modellen abbilden zu können.

ITS und FAS sollen den Fahrer frühzeitig auf Gefahren im Fahrtverlauf aufmerksam machen und können so zu einer Vermeidung von Unfällen bzw. einer Minderung von Unfallfolgen beitragen.

Voraussetzungen für die Fahrerunterstützung durch ITS und FAS sind, dass:

- Gefahr und Gefahrenort bekannt sind,
- die Warnung rechtzeitig zum Fahrer gelangt
- und der Fahrer entsprechend auf die Warnung reagiert.

Die wesentlichen Einflüsse auf das Unfallgeschehen liegen im zeitlich veränderlichen Zusammentreffen von Fahrer und Fahrzeug und Umfeld bzw. Umwelt, ggf. unter dem Einfluss von ITS (siehe Bild 2-5). Der „Fahrer“ ist charakterisiert durch verschiedene Eigenschaften, Fähigkeiten und Fertigkeiten z. B. Alter, Persönlichkeit, Gesundheit, Aufmerksamkeit, Müdigkeit, Fahrerfahrung. Das „Fahrzeug“ kann beschrieben werden durch z. B. Klasse, Typ, Zustand oder Ausstattung. Das Umfeld bzw. die Umwelt besteht aus bestimmten Konstellationen anderer Fahrer-Fahrzeug-Einheiten (Verkehrszustände) mit der Straße (Straßentyp und Fahraufgabe) unter bestimmten Wetterbedingungen. Auf die häufigsten Einflussfaktoren auf das Unfallgeschehen wird nachfolgend detaillierter eingegangen.

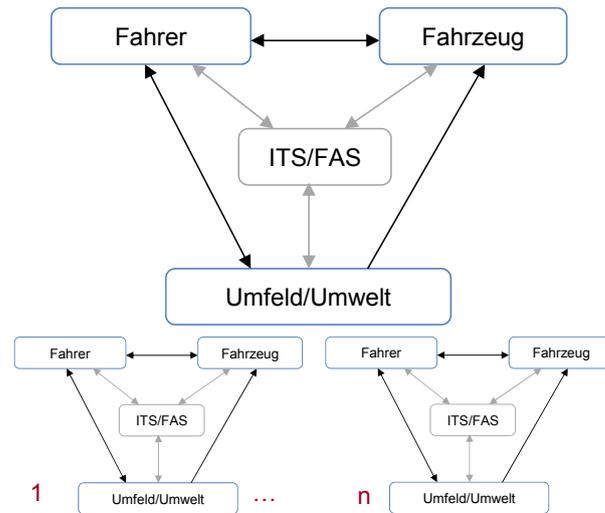


Bild 2-5: Beschreibung des Zusammenspiels von Fahrer, Fahrzeug, ITS und Umfeld

2.3.1.1 Einflussfaktor Fahrer

Die mit Abstand größte Fehlerquelle für die Entstehung von Unfällen ist der Fahrer selbst. Fahrerassistenzsysteme (FAS) und infrastrukturseitige ITS setzen an dieser Stelle an und können den Fahrer durch frühzeitige Information und Warnung bzw. aktiven Eingriff unterstützen.

BRIEST UND VOLLRATH [2006] untersuchten etwa 4500 Unfälle anhand der Modelle zur menschlichen Informationsverarbeitung von HACKER [1998] und RASMUSSEN [1982] und analysierten die unterschiedlichen Unfalltypen hinsichtlich der ursächlichen Fehlhandlungen. Anhand dieser Erkenntnisse wird abgeleitet, welche Einsatzbereiche für FAS besonders sinnvoll sein können. Wichtige Einsatzbereiche sind demnach:

„Ein System zur Kollisionsvermeidung mit situationsabhängiger Abstands- und Geschwindigkeitsregelung, das stehende Fahrzeuge erkennt und den Fahrer beim Bremsen unterstützt, könnte 17,5 % aller schweren Unfälle vermeiden. Da die Ursachen hier vor allem im Bereich von Fehlentscheidungen liegen, ist eine aktive Unterstützung durch ein FAS erforderlich.“
 [...] *„Mit einem System zur situationsabhängigen Geschwindigkeitsregulation mit Unterstützung der Querführung ließen sich 20,4 % der schweren Unfälle verhindern. Da die häufigsten Ursachen hier ebenfalls Fehlentscheidungen sind, ist ebenso eine aktive Unterstützung des Fahrers erforderlich.“* BRIEST UND VOLLRATH [2006]

Verschiedene Quellen aus dem Bereich der Psychologie zeigen über die letzten Jahrzehnte einen kontinuierlichen Anstieg der Verkehrsunfälle, die durch menschliches Fehlverhalten verursacht wurden. Während in den 1960er ein Drittel der Unfälle auf menschliches Fehlverhalten zurückzuführen war, waren es in den 1970er schon mehr als die Hälfte [vgl. TREAT ET AL., 1977] und inzwischen schon bis zu 90 % aller Unfälle.

Die Gründe für diesen Anstieg sind vielfältig. Neben zunehmend komplexeren Fahraufgaben, die höhere Anforderungen an den Menschen stellen, sind sicherlich auch verbesserte Erhebungsmethoden für menschliches Fehlverhalten Ursachen für den beobachteten Anstieg. Aber auch die zunehmende technische Verbesserung der Fahrzeuge, welche den relativen Anteil der anderen Ursachen erhöht, hat sicherlich einen Einfluss [vgl. auch ARCHER, 2005].

Unfälle aufgrund von Unaufmerksamkeit oder Übermüdung sind in den offiziellen polizeilichen Unfallstatistiken unterrepräsentiert, da diese Unfallursache aus versicherungstechnischen Gründen häufig nicht durch die Unfallverursacher genannt wird. Das Institut für Fahrzeugsicherheit des Gesamtverbandes der deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) untersuchte durch eine Totalerhebung alle Unfälle mit Getöteten (204 Unfälle mit 242 Getöteten), die sich 1991 auf Autobahnen des Freistaats Bayern ereignet hatten [HELL, 2004]: Es wurde festgestellt, dass rd. ein Viertel (24 %) aller untersuchten Unfälle vermutlich durch Einschlafen des Fahrers verursacht wurden. Weitere 11 % der Unfälle wurden durch Ablenkung und Unaufmerksamkeit verursacht. Insgesamt wurden 38 % aller untersuchten tödlichen Unfälle auf Autobahnen als so genannte Vigilanzunfälle (Aufmerksamkeitsstörung) eingestuft. Andere Faktoren bestanden zu 46 % in Fehleinschätzungen, z. B. von Witterung, der Straßenführung, der Fahrdynamik des eigenen Fahrzeugs oder des vorausfahrenden Fahrzeugs. Unvorhersehbare Ereignisse wurden in 11 % der Unfälle beobachtet (z. B. Wild, Panne, Geisterfahrer oder Suizid). Weitere 5 % der Auslösefaktoren für tödliche Unfälle auf Autobahnen lassen sich auf technische Mängel am Fahrzeug, hauptsächlich Reifenpannen, zurückführen.

2.3.1.2 Einflussfaktor Umwelt – Witterung

Auch witterungsbedingte Unfälle basieren zu großen Anteilen auf unangepasstem Verhalten der Fahrer.

ROBATSCH [2003] analysierte Unfälle mit Personenschaden in Österreich aus dem Jahr 2002 hinsichtlich des Einflusses der Witterung. Der überwiegende Teil der Unfälle ereignet sich bei heiterem bzw. bewölktem Wetter, nicht bei ungünstigen Witterungsbedingungen. Unter 1 % der Unfälle geschah bei Nebel oder Wind. Hierbei muss beachtet werden, dass es weit weniger Tage mit Nebel oder Wind gibt, als heitere bzw. bewölkte Tage. Die Betrachtung der Verletzungsschwere bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen zeigt eine weitaus höhere Verletzungsschwere bei Nebel als bei den anderen Witterungsbedingungen.

Unfälle, bei denen Nebel als Ursache genannt wird, bilden zahlenmäßig nur einen sehr kleinen Anteil aller polizeilich erfassten Unfälle [DEBUS et al., 2005]: Der Anteil von Nebelunfällen lag in den Jahren 1995 bis 2001 bei nur maximal 0,21 %. Unfälle mit der Ursache Nebel sind jedoch häufig besonders schwerwiegende Unfälle. Bei Nebelunfällen werden mehr Personen getötet oder schwer verletzt als bei Unfällen mit anderen Ursachen. Während beispielsweise Unfälle mit der Ursache Nebel im Jahr 1999 nur 0,13 % von allen Unfällen mit Personenschaden ausmachten, kamen 0,31 % aller Getöteten in Nebelunfällen um. Typische Fahrerseitige Unfallursachen sind in der Regel: zu hohe Geschwindigkeiten (60 %), Überholen oder unangemessener Abstand (zusammen 10 %).

2.3.1.3 Einflussfaktor Umwelt – Hindernis, Baustellen, Falschfahrer

Im Rahmen einer Potenzialanalyse für ein DAB-basiertes Fahrerwarnsystem untersuchten ASSENMACHER & BUSCH [2007] das Unfallgeschehen in Deutschland und detaillierter in einem Teilbereich des Münchner Nordes. Hinsichtlich des Einflusses von Hindernissen, Personen und Tieren wurde festgestellt, dass rd. 1 % aller Unfälle auf deutschen Autobahnen durch Warnung vor Hindernissen, Personen oder Tieren adressierbar wäre, soweit die Information rechtzeitig vorhanden ist. Diese Unfallursachen führten zu 4 % der Unfälle mit Getöteten und 4 % der Getöteten auf deutschen Autobahnen in den Jahren 2003 bis 2005. Ungesicherte Pannen oder Unfallstellen verursachen auf deutschen Autobahnen zwar verschwindend geringe absolute Anteile am Unfallgeschehen, verursachen jedoch - relativ betrachtet - schwerwiegende Unfallfolgen. Knapp 10 % dieser Unfälle mit Personenschaden waren 2003 bis 2005 Unfälle mit Getöteten. 5 % der Unfälle mit Personenschaden auf deutschen BAB (2003-2005) ereigneten sich im Bereich von Arbeitsstellen und verursachten 5 % der Verunglückten. Trotz des allgemeinen Rückgangs der Unfallzahlen und Unfallopfer steigt die Anzahl der Unfälle und Personenschäden im Bereich von Arbeitsstellen seit 2003 an. In den verkehrsschwächeren Zeiten mit niedrigen Verkehrsstärken und damit verbundenen hohen Geschwindigkeiten auf Autobahnen sind die Unfallraten vergleichsweise hoch und die Unfallfolgen besonders schwerwiegend.

2.3.1.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die vorangehenden Abschnitte fassen die wesentlichen Ursachen für das Unfallgeschehen zusammen und zeigen die fehleranfälligen Aspekte im System. Diese Kenntnis ermöglicht die Entwicklung von entsprechender technischer Unterstützung für die Fahrer. Für die Entwicklungsunterstützung und simulative Wirkungsanalyse solcher Systeme müssen verschiedene Aspekte des Fahrerverhaltens modellierbar sein. Das Verhalten der Fahrer hat den größten Einfluss auf das Unfallgeschehen. Gründe dafür sind häufig Unaufmerksamkeiten und Übermüdungen, nicht angepasste Geschwindigkeiten und Überholen oder zu dichtes Auffahren trotz unzureichender Kenntnis der Verkehrssituation. Auch bei den Unfällen mit Arbeitsstellen wird vermutet, dass die Fahrer nicht adäquat auf zulässige Höchstgeschwindigkeiten und Warnhinweise reagieren. Ebenso die Reaktion auf Hindernisse muss noch genauer untersucht werden.

In welchem Detaillierungsgrad die Modellierung des Fahrerverhaltens notwendig ist und ob diese Aspekte direkt oder indirekt in der Verkehrssimulation nachgebildet werden müssen, wird im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit geklärt. Die Betrachtung des Unfallgeschehens zeigt, dass das fehlerbehaftete Fahrerverhalten hinsichtlich Geschwindigkeitswahl und Abstand, also das Längsverhalten, und auch das Verhalten bei Fahrstreifenwechseln, das Querverhalten, genauer betrachtet werden muss. Für den Vergleich muss ebenso das regelkonforme Verhalten in Längs- und Querrichtung untersucht werden.

Es muss geklärt werden, welche Ebenen des Fehlverhaltens in der Modellierung berücksichtigt werden müssen und inwieweit ebenso die Ursachen für das Fehlverhalten abgebildet

werden müssen, was sowohl in der Erfassung als auch in der Modellierung sehr komplex ist. Inwieweit genügt es daher für die geplanten Untersuchungen, die Wirkungen des Fehlverhaltens zu modellieren? Dies bedeutet beispielsweise: Ist es notwendig, Unaufmerksamkeiten des Fahrers oder dessen falsche Einschätzungen der Situation zu modellieren oder ist es ausreichend z. B. einen verspäteten Reaktionsbeginn zu modellieren?

2.3.2 Verkehrssicherheit – Untersuchungsansätze

Um eine gute Prognose über die zukünftigen Wirkpotenziale von FAS und ITS zu geben, müssen aussagekräftige Kenngrößen und Bewertungsmodelle angewendet werden. Im Bereich der Fahrerassistenzsysteme sind zusätzlich auch die Veränderungen im mikroskopischen Interaktionsverhalten der Verkehrsteilnehmer untereinander und in Relation zur Gefahrenquelle relevant. Weiterhin ist es sinnvoll, auch Häufigkeiten und Schweregrade und deren Einflussfaktoren unter Berücksichtigung der jeweiligen Randbedingungen bei der umfassenden Ermittlung von Wirkpotenzialen zu berücksichtigen.

Im Folgenden werden verschiedene Bewertungsansätze und deren Kenngrößen zusammengestellt, um die Frage zu beantworten, wie gut etablierte Kenngrößen gerade im Bereich der Verkehrssicherheit diese eben genannten Relationen abbilden können. Weiterhin interessiert, wie die vorliegenden Randbedingungen die jeweiligen Kenngrößen beeinflussen und wie der Einfluss beschrieben werden kann.

2.3.2.1 Betrachtung von Unfällen

Unfallentstehungsmodelle sollen helfen, die Unfallursachen und das damit verbundene Fahrerverhalten zu verstehen. Die Betrachtung von Unfällen unterstützt die Entscheidung, welche Unfallursachen und -zusammenhänge in der Modellierung zu berücksichtigen sind.

Die Polizei erhebt am Unfallort bestimmte Daten wie z. B. Unfallausgang, Unfallart und Unfallursachen. Diese Daten sind ebenso die Basis für die amtlichen Unfallstatistiken. Diese helfen, die häufigsten Unfallursachen und allgemeine Zusammenhänge des Unfallgeschehens auf einer makroskopischen Betrachtungsebene zu erfassen. Für mikroskopische Zusammenhänge, wie z. B. die Wirkungsermittlung zukünftiger Fahrerassistenzsysteme bei unterschiedlichen System- oder Ausstattungsvarianten, sind die Daten aber meist zu wenig detailliert. Die gerade bei der Untersuchung von Fahrerassistenzsystemen relevante, dem Unfall vorausgehende Phase, wird in der Regel durch die offiziellen Statistiken nicht erfasst. Daher sind nur pauschalierende Informationen durch traditionelle Unfallanalyse und Statistik möglich.

Eine sehr detaillierte Datenquelle über Unfälle und ihre Entstehung bieten sogenannte In-Depth Unfalluntersuchungen wie z. B. GIDAS (German In-Depth Accident Study) (vgl. www.gidas.org). Seit Mitte 1999 werden im Projekt GIDAS in den Großräumen Hannover und Dresden ca. 2000 Unfälle pro Jahr vor Ort untersucht. Es werden sehr detaillierte technische und medizinische Daten erhoben, um das Unfallgeschehen zu rekonstruieren.

Die detailliertere Betrachtung ermöglicht, die nicht sofort offensichtlichen Ursachen für das komplexe Ereignis „Unfall“ zu erkennen. Durch die Polizei werden in der routinemäßigen Unfalldatenaufnahme hauptsächlich die einfach erfassbaren Zusammenhänge erhoben, so dass z. B. als Ursache „überhöhte Geschwindigkeit“ in die Statistiken eingeht. Die detaillierte Betrachtung untersucht, warum sich der Fahrer mit überhöhter Geschwindigkeit genähert hat, also z. B. weil er unaufmerksam war oder die Situation nicht richtig eingeschätzt hat. Im weiteren Schritt kann z. B. überlegt werden, warum der Fahrer unaufmerksam war. War er z. B. abgelenkt,... usw. In aufwändigen Einzelunfallbetrachtungen oder auch mit Unfallsimulationen können Aussagen über Unfallvermeidungspotenziale neuer Systeme anhand der erhobenen historischen Daten getroffen werden.

Das Unfallentstehungsmodell nach Nirschl et al. (2004) (zitiert nach GLASER & WASCHULEWSKI, 2005) basiert auf der Betrachtung von Fahrfehlern (einzelne Fahrerhandlungen verlaufen nicht so, wie vom Fahrer intendiert). Zu dem Zeitpunkt dieses Fahrfehlers ist ein Konfliktobjekt vorhanden, dadurch entsteht ein Verkehrskonflikt. Die Konfliktpartner versuchen meist, den Unfall zu vermeiden und den Konflikt zu bewältigen. Gelingt dies nicht, so entsteht ein Unfall. Fahrerassistenzsysteme können an verschiedenen Stellen Einfluss nehmen. Sie können Fahrfehler reduzieren oder bei der Konfliktbewältigung unterstützen.

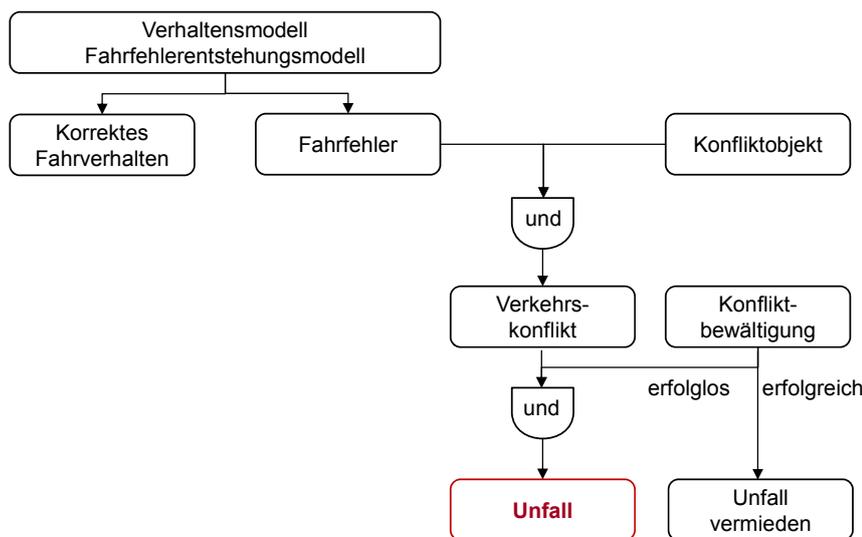


Bild 2-6: Relationen aus Fahrermodell, Fahrfehler und Unfallentstehung als Auszug aus [GLASER & WASCHULEWSKI 2005]

Eine Verringerung der Unfallwahrscheinlichkeit und -schwere geht mit einer Erhöhung der Sicherheit einher [vgl. GLASER & WASCHULEWSKI, 2005]. Sicherheit kann man sich vereinfacht so vorstellen: $\text{Sicherheit} = 1 - \text{Unfallwahrscheinlichkeit}$.

Folgende Pyramidendarstellung nach Hydén (zitiert nach [ARCHER, 2005]) verdeutlicht die Ereignishäufigkeiten von verkehrssicherheitskritischen Ereignissen. Unfälle sind nur sehr selten in Relation zur Häufigkeit ungestörter Fahrzustände und Konflikte und damit bildlich gesprochen lediglich die kleine Spitze des Eisbergs:

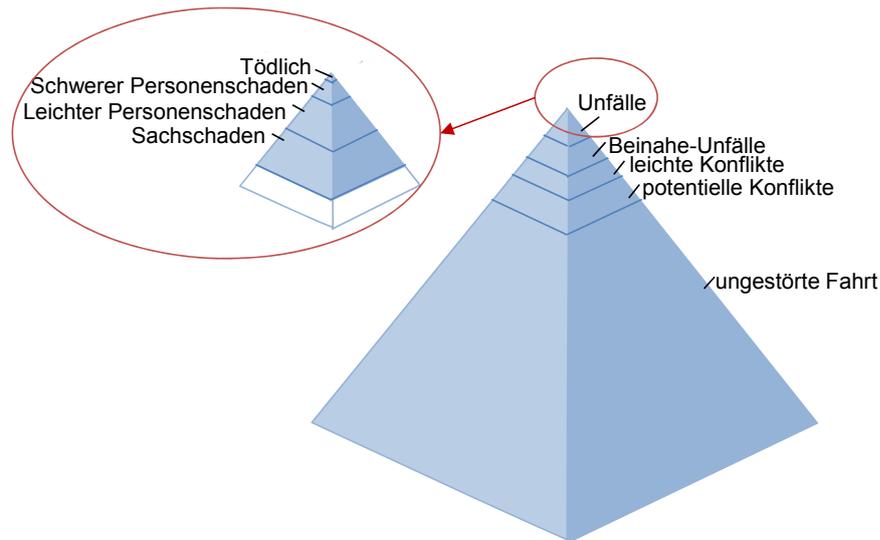


Bild 2-7: Pyramidendarstellung der Ereignishäufigkeiten von verkehrssicherheitskritischen Ereignissen in Relationen zu normalen, sicheren Fahrtzuständen nach Hydén, zitiert nach [ARCHER, 2005]

Nachdem die Anteile der ITS- und FAS-relevanten Unfälle wiederum eine Untermenge des gesamten Unfallgeschehens sind und damit relativ selten vorkommen, ist die unfallbasierte Betrachtung - wie bereits formuliert - sehr unpraktikabel für die Fragestellung dieser Arbeit. Verkehrskonflikte und Beinahe-Unfälle sind sehr viel häufiger und damit wahrscheinlicher. Nach Reichart [2001] ist ein Verkehrskonflikt zwischen 100 und 100.000 mal wahrscheinlicher als der Unfall.

2.3.2.2 Betrachtung von Verkehrskonflikten

Ein Verkehrskonflikt ist nach AMUNDSEN & HYDEN [1977] eine beobachtbare Situation, in der sich zwei oder mehr Verkehrsteilnehmer in Zeit und Ort so einander nähern, dass sich ein Kollisionsrisiko ergibt, sofern sich ihre Bewegung nicht ändert. Nach CUNTO & SACCOMANNO [2007] ist ein Verkehrskonflikt das direkte Aufeinanderliegen von Fahrzeugtrajektorien, d. h. mehr als ein Fahrzeug befindet sich zur selben Zeit am selben Ort.

Die Verkehrskonflikttechnik ist eine Methode zur Erfassung von Verkehrskonflikten, die hauptsächlich an Knotenpunkten durch menschliche Beobachtung praktiziert wird. Im Zusammenhang mit der Verkehrskonflikttechnik wird häufig nach der Relation aus Verkehrskonfliktanzahl und Unfallanzahl gesucht. Diese relationalen Zusammenhänge werden häufig kontrovers diskutiert, wenn aus der Anzahl von ermittelten Verkehrskonflikten eine Anzahl an Verkehrsunfällen prognostiziert werden soll. Gerade der subjektive Aspekt bei der Erfassung der Verkehrskonflikte durch die Beobachter ist ein wesentlicher Einflussfaktor für die ermittelten Relationen zwischen Konflikt und Unfall. Dennoch wird davon ausgegangen, dass eine höhere Anzahl an Verkehrskonflikten ein geringeres Maß an Verkehrssicherheit bedingt, vgl. [RISSER, 1985; ARCHER, 2000; GETTMAN & HEAD, 2003].

2.3.2.3 Betrachtung von mikroskopischen Kenngrößen

GETTMAN & HEAD [2003] untersuchen die Nutzung von sogenannten mikroskopischen Ersatzkenngrößen in SAM (Surrogate Safety Assessment Methodology) aus Verkehrssimulationen zur Verkehrssicherheitsanalyse an Knotenpunkten. Basierend auf einer Eignungsprüfung bestehender Verkehrssimulationen entwickeln sie eine Software, die die Simulationsdaten nutzt und Aussagen hinsichtlich szenarienabhängiger Wirkungen auf die Verkehrssicherheit ermöglicht. Das Vorgehen ist vergleichbar mit der Verkehrskonflikttechnik, aber ohne den Kritikpunkt der Subjektivität, denn durch die Automatisierung werden die Ergebnisse vergleichbar und objektiv. Folgende „Ersatzkenngrößen“ wurden in SAM integriert:

- Minimale Time-to-Collision (TTC) während des Konflikts
- Minimale Post-Encroachment-Time (PET) während des Konflikts
- Maximale Geschwindigkeiten der Konfliktfahrzeuge
- Maximaler Geschwindigkeitsunterschied der Konfliktfahrzeuge
- Initiale Verzögerung des reagierenden Fahrzeugs
- Positionen des Beginns und Endes des Konfliktereignisses

Für die nähere Erläuterung der Kenngrößen siehe *Abschnitt 2.3.3 Kenngrößen*.

Ein Ziel der simulativen Untersuchung ist dabei nicht, die absoluten Kenngrößen aus einem Feldversuch zu replizieren, sondern die Untersuchung, ob die Kenngrößen mit realem Verhalten korrelieren. Dies bedeutet allerdings auch nicht, dass diese Ersatzkenngrößen eins zu eins mit der aktuellen Unfall- oder Konfliktanzahl eines betrachteten Knotenpunkts übereinstimmen müssen. Vielmehr interessieren bei diesem Ansatz die relativen Unterschiede bzw. eine Wirkreihenfolge verschiedener Alternativen.

2.3.2.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Es wurden verschiedene Betrachtungsweisen und Begrifflichkeiten zum Thema Verkehrssicherheit vorgestellt. Unfälle sind seltene Ereignisse und bei einer detaillierten Erfassung und Analyse fehlt häufig die genügend große Datenbasis für statistisch gesicherte Aussagen. Es ist nicht möglich, „vermiedene Unfälle“ in der Zukunft zu zählen. Somit müssen Möglichkeiten entwickelt werden, die den Zustand der Verkehrssicherheit erfassen und Aussagen über verkehrssicherheitskritisches Risiko ermöglichen, auch ohne die Maßeinheit Unfall zu verwenden.

Zwischen den Fahrzuständen Unfall und nicht Unfall liegen die Ebenen Verkehrskonflikt und Beinahe-Unfälle als Stufen, die sich als unsicheres Verhalten zusammenfassen lassen. Diese sind häufiger als Unfälle und damit auch in zeitlich begrenzten Simulationen beobachtbar, allerdings sind für die Unterscheidung ob z. B. ein Konflikt vorliegt, detaillierte Hintergrundinformationen über die Situation notwendig. Zwischen sicheren und unsicheren Zuständen kann aber auch mit Hilfe von Häufigkeitsverteilungen charakteristischer mikroskopischer Kenngrößen und entsprechenden Grenzwerten unterschieden werden. Meist ist das Ziel

einer simulativen Untersuchung, die beste Systemalternative herauszufinden, basierend auf relativen Unterschieden in der sicherheitserhöhenden Wirkung. Dies kann auch durch den Vergleich der Verteilungen bestimmter Kenngrößen z. B. zum Abstandsverhalten erfolgen. Verändert sich z. B. das mittlere Abstandsverhalten durch verschiedenen Systemalternativen, können dadurch Rückschlüsse auf die Wirkung auf die Verkehrssicherheit gezogen werden. In der vorliegenden Arbeit wird die datenbasierte Ermittlung der Ersatzkenngrößen und deren Varianzen als geeignet für die Untersuchungsziele angesehen.

2.3.3 Kenngrößen

Die Zusammenstellung verkehrstechnischer Kenngrößen ist Basis für verschiedene Aspekte der geplanten Modifizierung einer Verkehrssimulation. Im Folgenden werden mögliche Kenngrößen erläutert und überprüft, ob sie geeignet sind, die Modellierung von Fahrerverhalten zu verbessern. Dabei werden folgenden Kenngrößenkategorien und Einsatzbereiche unterschieden (siehe Bild 2-8):

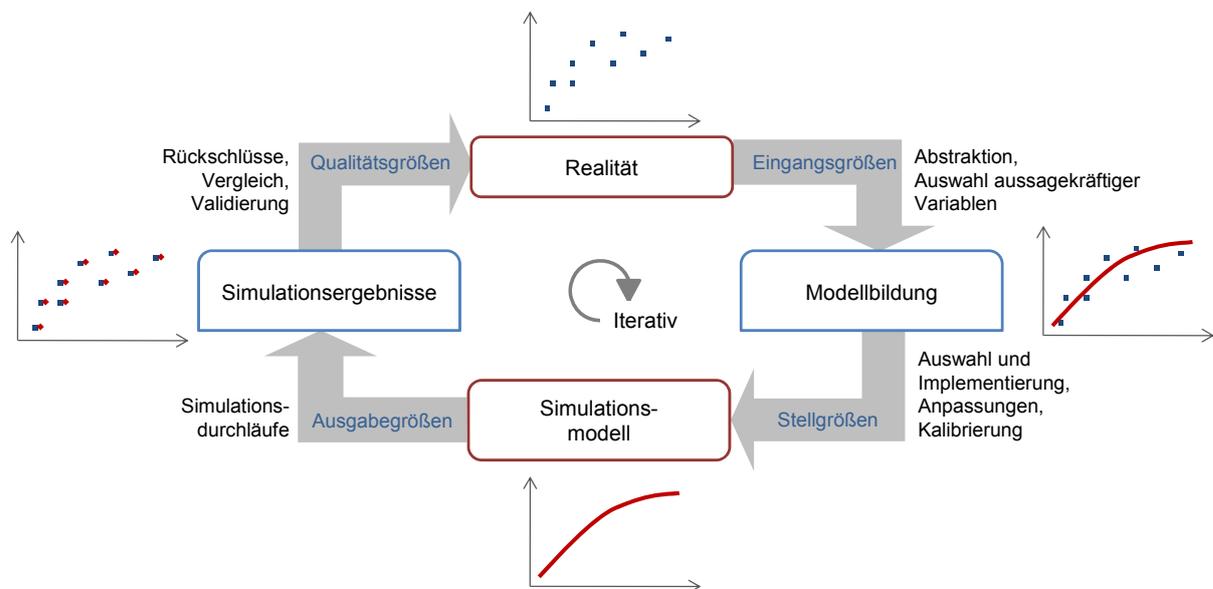


Bild 2-8: Darstellung der Einsatzbereiche von Kenngrößen als Eingangsgrößen, Stellgrößen, Ausgabegrößen und Qualitätsgrößen für die Modellierung

Die Kenngrößenkategorien sind im Einzelnen:

- *Eingangsgrößen* in die Verkehrssimulation sind Daten von realen Fahrern erweitert um Informationen über die jeweils vorherrschende Untersuchungssituation. Sie liefern Erkenntnisse über das grundsätzliche Fahrerverhalten.
- *Simulationskenngrößen* unterteilen sich in:
 - *Stellgrößen* zur Modellierung in gängigen Fahrermodellen und
 - *Ausgabegrößen* aus der Verkehrssimulation für eine verkehrstechnische Wirkungsanalyse mit dem Schwerpunkt auf Verkehrssicherheit.

- *Qualitätsgrößen* ermöglichen den Vergleich des Fahrerverhaltens in der Verkehrssimulation mit dem erhobenen Fahrerverhalten von realen Fahrern.
- Zusätzlich müssen bei einer Auswertung vorhandener Daten auch *Situationskenngrößen* vorhanden sein, die die Randbedingungen beschreiben, unter denen die Datenbasis erhoben wurde.

Kenngößen können hinsichtlich ihrer Erhebung in fahrzeugseitige und infrastrukturseitige Kenngößen unterteilt werden.

Im Bereich der fahrzeugseitigen Erfassung im realen Straßenverkehr bieten kontinuierliche Positions- und Sensordaten eine Vielzahl neuer Möglichkeiten. Nicht nur für die Entwicklung neuer Assistenzsysteme, sondern auch als Grundstein für neue Erkenntnisse über das Fahrerverhalten und auch die Wirkungsanalyse verkehrstechnischer Maßnahmen. Die über Ort und Zeit erfassten Daten zu Geschwindigkeit, Beschleunigung oder Geschwindigkeits- und Abstandsunterschiede zum Vorderfahrzeug sind wertvolle Informationen. Diese *kontinuierlich erfassten mikroskopischen Daten* bieten viele Möglichkeiten für die vorliegende Fragestellung, wie z. B. deren Veränderungen je nach Situation und Fahrzeuggruppe, die durch bestimmte Fahrzeugklassen oder Ausstattungsattribute charakterisiert ist. Aussagen über das verkehrliche Zusammenspiel und Verkehrseffizienz und -sicherheit sind nur bei einem sehr hohen Ausstattungsgrad bzw. bei hoher Zugänglichkeit der Fahrzeugdaten möglich. Gerade Aussagen zu bestimmten Kenngößen der Verkehrssicherheit sind meist nur bei Vollerfassung aller Fahrzeuge möglich. Je nach Versuchsumgebung fehlt oft auch die Information über den aktuell benutzten Fahrstreifen. Im realen Straßenverkehr ist die Lokalisierung des Fahrstreifens oder gar die Position innerhalb des Fahrstreifens meist nicht vorhanden. In abgeschlossenen Testgeländen kann dies z. B. durch lokale Beobachtungen zusätzlich erhoben werden. Fahrsimulationen bieten das Potenzial für die vollständigste Information (abhängig vom Detaillierungsgrad des Simulators) über den Fahrzeugstatus.

Infrastrukturseitige Daten bestehen häufig aus lokalen Messungen pro Fahrstreifen an einem Querschnitt. Sie bieten den Vorteil, dass i.d.R. alle passierenden Fahrzeuge erfasst werden. Die Daten können pro Strecke und darauf aufbauend auf Netzebene aggregiert werden. Je nach Detektorart können auch infrastrukturgenerierte Daten für verschiedene Fahrzeuggruppen (z. B. LKW und PKW) aggregiert werden. Bei der lokalen Betrachtung (z. B. am Querschnitt (QS)) werden die Daten über die Zeit aggregiert (z. B. Verkehrsstärke [Fz/h]) bei der momentanen Beobachtung (z. B. zum Zeitpunkt t) werden die Fahrzeuge auf einem definierten Streckenabschnitt betrachtet (z. B. Verkehrsdichte [Fz/km]).

Mit Hilfe von Videokameras kann der Verkehr beobachtet und erfasst werden. Aus den Videobildern eines längeren Streckenabschnitts lassen sich Trajektorien, d. h. Abbildung der Fahrzeugpositionen über die Zeit, erzeugen. Diese Daten entsprechen im Wesentlichen den Daten, die auch durch die Fahrzeuge übertragen werden können. Bei einer infrastrukturseitigen Erfassung können allerdings alle Fahrzeuge in einem definierten Streckenabschnitt erfasst werden. Es sind kontinuierliche mikroskopische Daten, die im Unterschied zu den fahr-

zeugseitig erfassten Daten keine Informationen der fahrzeugseitigen Sensorik oder über andere Ausstattungsmerkmale (wie z. B. FAS) enthalten.

Bild 2-9 zeigt Fahrzeugtrajektorien und mögliche Aggregierungsstufen für die Wirkungsanalyse:

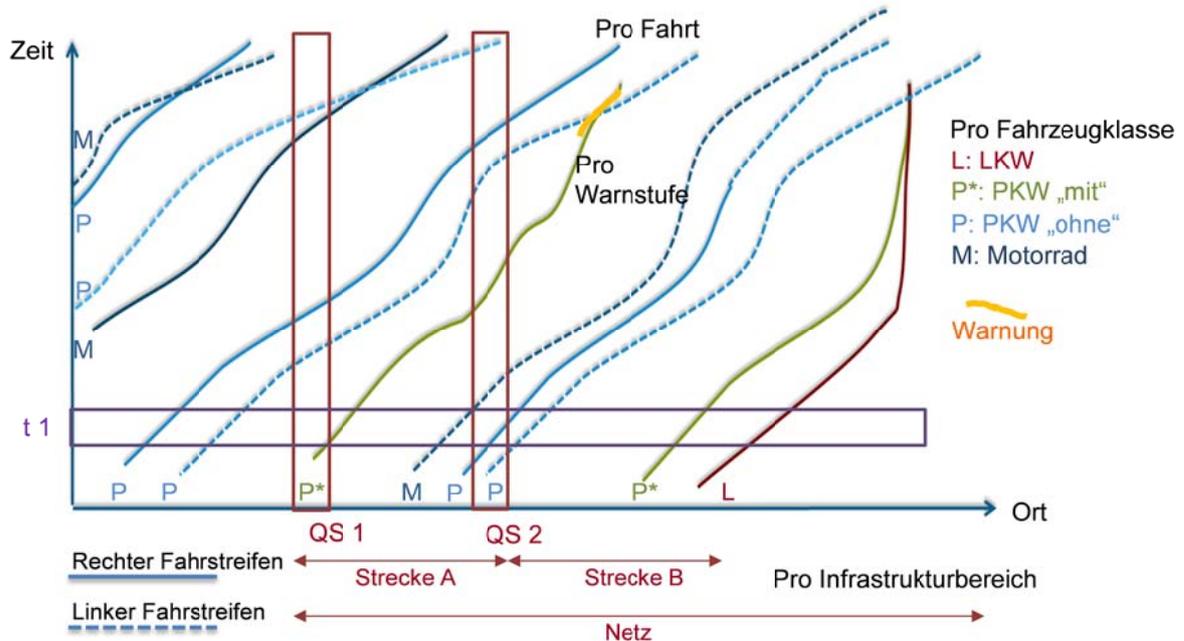


Bild 2-9: Zeit-Weg-Darstellung von mehreren Fahrzeugtrajektorien und mögliche Aggregierungsstufen für die Wirkungsanalyse von kontinuierlich erhobenen mikroskopischen Kenngrößen

Je nach Aggregation lassen sich aus mikroskopischen Einzelfahrzeugdaten unterschiedliche Erkenntnisse gewinnen. Mögliche Aggregierungsstufen sind:

- die zeitlich-orientierte Aggregation, z. B. pro Sekunde, Minute, Stunde oder Tag,
- die räumlich-orientierte Aggregation, z. B. pro Fahrstreifen, Querschnitt, Strecke, Netz, Route oder Fahrt (Startort, Zielort) und
- die Fahrer-Fahrzeug-orientierte Aggregation, z. B. pro Fahrer, Fahrertyp, Fahrzeuggruppe oder Ausstattungsmerkmal.

Die Aussagekraft unterschiedlicher Kenngrößen hängt stark davon ab, welche Werte aus dem zeitlichen, räumlichen oder fahrer-fahrzeug-orientierten Verlauf verwendet werden. Neben der Betrachtung von Mittelwerten, Medianen, Standardabweichungen, Perzentilwerten, usw. ist für die Modellierung und auch Wirkungsermittlung auch die Betrachtung von Extremwerten geeignet, dies sind beispielsweise (siehe auch Bild 2-10):

- Minima und Maxima,
- Verhältnis von Minimum zu Maximum und auch
- Anteile der charakteristischen Werte an der Gesamtdatenmenge (zeitlich, räumlich).

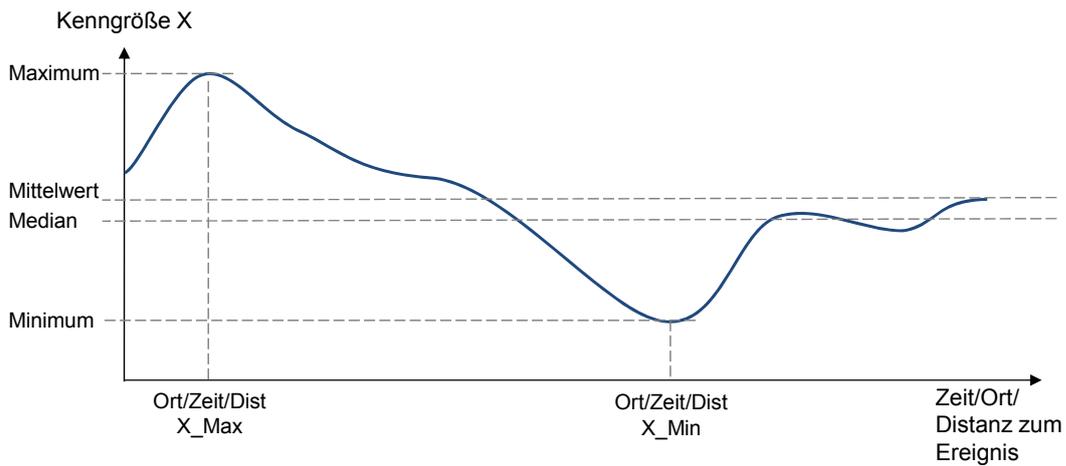


Bild 2-10: Allgemeine Darstellung möglicher charakteristische Werte für die Kenngrößenermittlung bei zeitlich-räumlich kontinuierlich vorhandenen Messgrößen

Für die Kenngrößen werden häufig Schwellwerte für die Unterscheidung von sicheren und unsicheren Werten gewählt. Sofern es in der Literatur einschlägige Meinungen zu Schwellwerten der jeweiligen Kenngröße gibt, werden diese in den nachfolgenden Beschreibungen der Kenngrößen ergänzt.

Für die Auswertung der Kenngrößen ist nicht nur die Suche, ob eine Überschreitung oder Unterschreitung von möglichen Schwellwerten vorliegt interessant, sondern auch z. B. deren Häufigkeit, Dauer oder der Fahrtzeitanteil. Auch die Ausprägung der Über- oder Unterschreitung gibt wichtige Informationen. Ein Ansatz, der für die Interpretation der Kenngröße Time-To-Collision (TTC) entwickelt und verwendet wird, ist die Betrachtung von Expositionszeiten (Time-Exposed-TTC (TET)) und Expositionsstärken (Time-Integrated-TTC (TIT)), vgl. hierzu: MINDERHOUD & BOVY [2001], siehe Bild 2-11.

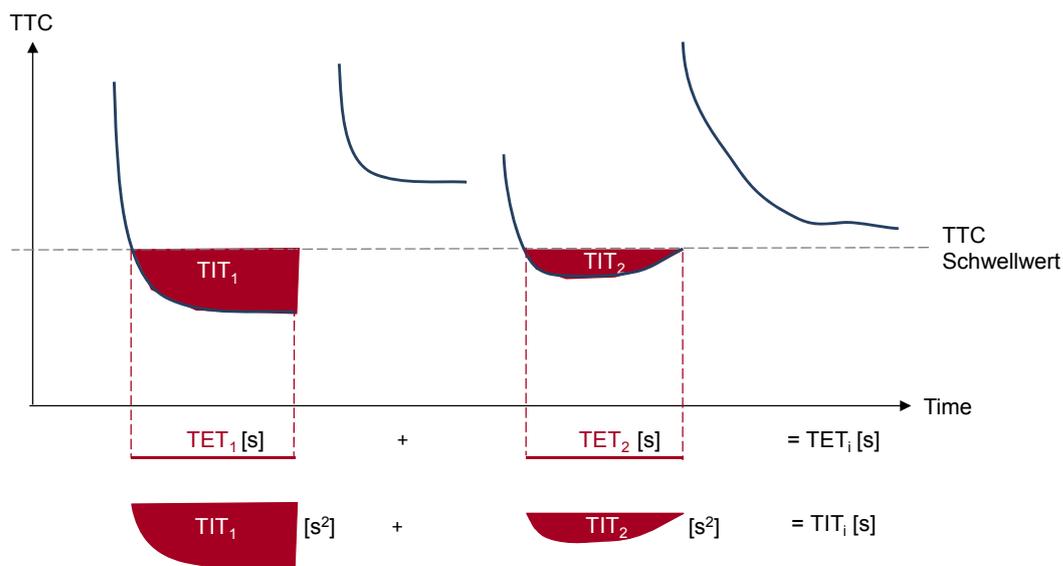


Bild 2-11: Time-To-Collision und die daraus abgeleiteten Kenngrößen TET und TIT in Anlehnung an [MINDERHOUD & BOVY, 2001]

TET (Time-Exposed-TTC) ist die Dauer des Unterschreitens des TTC unter einen zuvor definierten Schwellwert. Dieser Schwellwert entspricht der Grenze zwischen sicherer und unsicherer TTC. Je niedriger TET ist, desto sicherer ist die Situation. In der TET ist noch nicht berücksichtigt, dass von einer zunehmend unsicheren Situation ausgegangen werden kann, je niedriger die TTC ist. Dies berücksichtigt die Kenngröße TIT (Time Integrated TTC), indem das Integral des TTC Verlaufs ermittelt wird, [MINDERHOUD & BOVY, 2001].

Bei der folgenden Zusammenstellung möglicher Kenngrößen für die Wirkungsermittlung und Modellierung von Fahrerverhalten wird jeweils geprüft, ob dieser Ansatz auch auf andere Kenngrößen übertragen werden kann. Es wird geprüft, ob und welche Erkenntnisse durch die Berücksichtigung der Expositionsdauer und Expositionstärke gewonnen werden können. Durch diese Herangehensweise kann zwischen eventuell auftretenden starken und kurzen Reaktionen und schwachen und langen unterschieden werden. Beide Reaktionen könnten ggf. zum gleichen Ergebnis bei einer Mittelwertbetrachtung führen, sind bei der Modellierung des Fahrerverhaltens aber grundsätzlich voneinander abweichend.

Allerdings ist es nicht möglich, für jede Kenngröße situationsunabhängige fixierte Schwellenwerte für sicheres und unsicheres Verhalten zu definieren (wie z. B. $TTC < 2$ Sekunden oder < 4 Sekunden). Eventuell kann die Betrachtung von Perzentilwerten und damit von dynamischen, von Grundgesamtheit zu Grundgesamtheit variablen Schwellenwerten möglich und hilfreich sein.

Die Eignung und Verfügbarkeit verschiedener Kenngrößen als Eingangs-, Stell-, Ausgabe oder Qualitätskenngröße hängt unter anderem auch von der als Datenquelle gewählten Versuchsumgebung ab. Die Versuchsumgebung Fahrsimulation ist beispielsweise sehr gut geeignet, um relative Unterschiede im Fahrerverhalten mit und ohne System zu bestimmen. Die absoluten Werte für den Lenkwinkel sind aber ggf. nicht auf die Realität übertragbar, da der Fahrsimulator trotz aufwändigem Bewegungssystem nicht 100 % identisches Fahrerverhalten mit der Realität zeigt. Im Folgenden werden für die jeweiligen Versuchsumgebungen pro Kenngröße Möglichkeiten der Verwendbarkeit und ggf. Einschränkungen zusammengestellt.

Längsbeschleunigung

Die Längsbeschleunigung a_x eines Fahrzeugs ist die Änderung der Geschwindigkeit pro Zeiteinheit in Richtung der Längsachse. Eine negative Längsbeschleunigung wird auch als Verzögerung bezeichnet.

$$a_x = \frac{dv}{dt}$$

a = Beschleunigung
v = Geschwindigkeit
t = Zeit

Die Erhebung erfolgt fahrzeugseitig in realen Fahrzeugen oder in der Fahrsimulation oder in der Verkehrssimulation mittels entsprechender Sensorik bzw. durch Berechnung. Werte über die Längsbeschleunigung können infrastrukturseitig per Videobeobachtung und -analyse mit entsprechendem Datenverarbeitungsaufwand ermittelt werden. Bei der Verwendung von Beschleunigungswerten aus der Fahrsimulation muss berücksichtigt werden, dass ggf. die absoluten Werte aufgrund des ggf. fehlenden Bewegungssystems nicht repräsentativ sind, die relativen Werte (Änderungen, Relationen) können aber sehr gute Informationen über die Fahrerreaktionen und das Fahrerverhalten liefern.

Charakteristische Werte sind z. B. die minimale Längsbeschleunigung a_{x_min} - dies entspricht der maximalen Verzögerung - oder auch die mittlere Längsbeschleunigung a_{x_mittel} . Mögliche Aggregationsebenen sind z. B. pro Fahrer oder Fahrzeug, pro Strecke, pro Situation, pro Intervall. Die starke Änderung des Längsbeschleunigungsverhaltens $\max da_x$, bzw. der Beginn der Verzögerung und die jeweilige Distanz zum Ereignisort sind geeignete Indikatoren für den Reaktionsbeginn. Je nach Situation oder Fahrertyp treten starke Verzögerungen über einen kurzen Zeitraum oder schwache Verzögerung über einen langen Zeitraum auf. Die Betrachtung der Expositionsdauer und -stärke kann darüber Aufschluss geben: Time-Exposed-Critical-Deceleration (TED) und Time-Integrated-Critical-Deceleration (TID).

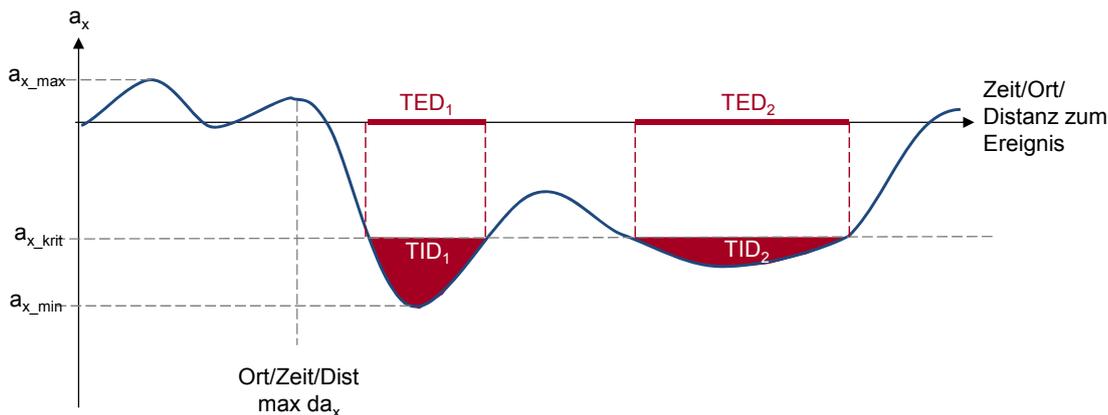


Bild 2-12: Beispiel für den zeitlichen oder räumlichen Verlauf der Längsbeschleunigung und deren charakteristischer Werte

Als mögliche Kritikalitätsschwelle kann in Anlehnung an FENK & PRAXENTHALER [1998] eine Längsbeschleunigung kleiner -4.5 m/s^2 bezeichnet werden.

Die Längsbeschleunigung ist als Eingangsgröße in die Modellierung geeignet, um indirekt den Reaktionsbeginn des Fahrers zu erfassen. Die Zeit bzw. der Ort oder die Distanz für den Reaktionsbeginn kann durch die starke Änderung der Beschleunigung gut geschätzt werden. Ebenso die Stärke von Beschleunigungen und Verzögerungen kann als direkte Eingangsgröße für die Verkehrssimulation verwendet werden.

Die Längsbeschleunigung als Simulationskenngröße: Als direkte Stellgröße z. B. Eingabe von Längsbeschleunigungsverläufen sind die Werte nur bedingt geeignet. Eine gute Möglichkeit stellt die Verwendung als Eingabe- und Kalibrierungsgröße von Verteilungen zu an-

gestrebten Beschleunigungen und Verzögerungen dar. Durch die Ausgabe und Analyse der charakteristischen Werte der Längsbeschleunigung können auch mit der Verkehrssimulation Aussagen hinsichtlich der Verkehrssicherheit getroffen werden. Die Nutzung der absoluten Werte ist dabei kritisch zu prüfen, aber die relativen Unterschiede zwischen verschiedenen Szenarien und deren Einfluss auf die Verkehrssicherheit können einen guten Einblick in die Wirkung neuer Systeme geben.

Wird die Längsbeschleunigung nicht als Stellgröße verwendet, so kann sie als Qualitätskenngröße genutzt werden, um die Verteilungen der charakteristischen Werte für die Längsbeschleunigung aus der Verkehrssimulation mit denen der Datenbasis (z. B. Straßenverkehr oder Fahrsimulation) zu vergleichen.

Die „notwendige Verzögerung“ ist eine abgeleitete Kenngröße, sie beschreibt die höchste notwendige Verzögerung eines Fahrzeugs zur Vermeidung einer Kollision [GETTMAN & HEAD, 2003].

Querbeschleunigung

Die Querbeschleunigung a_y eines Fahrzeugs ist die Änderung der Geschwindigkeit pro Zeiteinheit in Richtung der Querachse. Die Ausprägung ist abhängig von der auf einem bestimmten Kurvenradius gefahrenen Geschwindigkeit.

$$a_y = \frac{dv}{dt}$$

a = Beschleunigung
v = Geschwindigkeit
t = Zeit

Wenn ein Fahrzeug nicht geradeaus fährt, treten Querbeschleunigungen auf. Um den Fahrvorgang stabil zu halten, müssen sie durch Seitenführungskräfte kompensiert werden. Übersteigen die Querbeschleunigungen die Seitenführungskräfte, verliert das Fahrzeug seine Stabilität und bricht aus.

Die Erhebung erfolgt fahrzeugseitig in realen Fahrzeugen mittels Sensorik oder in der Fahrsimulation.

Charakteristische Werte sind z. B. die maximale Querbeschleunigung a_{y_max} sowie die starke Änderung der Querbeschleunigung und deren Distanz zum Ereignisort.

Mögliche Kritikalitätsschwellen sind laut SCHIMMELPFENNIG & NACKENHORST [1985] folgende Querbeschleunigungswerte, die als kritisch bezeichnet werden:

- bei Kurvenfahrten mit Geschwindigkeiten größer 100 km/h: Werte $> 1,5 \text{ m/s}^2$
- bei Spurwechseln bei Geschwindigkeiten größer 100 km/h: Werten $> 2 \text{ m/s}^2$

Eine starke Änderung der Querbewegung eines Fahrzeugs kann als indirekte Einganggröße in Relation zur Zeit oder über den Ort zeigen, wann der Fahrer auf vorausliegende kritische Ereignisse reagiert.

Die Querbewegung als Simulationskenngröße ist als Stell- und Ausgabegröße nicht relevant, da die Spurhaltung in den meisten mikroskopischen Verkehrssimulationen nicht detailliert abgebildet wird.

Geschwindigkeit

Nachdem die unangepasste Geschwindigkeit die Unfallursache Nummer 1 ist, kommt der Modellierung der Geschwindigkeit eine besondere Bedeutung zu. Die *Geschwindigkeit* v eines Fahrzeugs ist die Ortsveränderung pro Zeiteinheit

$$v = \frac{dx}{dt}$$

v = Geschwindigkeit

x = Ort

t = Zeit

Die Erhebung erfolgt fahrzeugseitig (reale Fahrzeuge oder Fahrsimulation oder Verkehrssimulation) mittels entsprechender Sensorik bzw. durch Berechnung. Werte über die Geschwindigkeiten können infrastrukturseitig durch entsprechende Detektion erfasst werden.

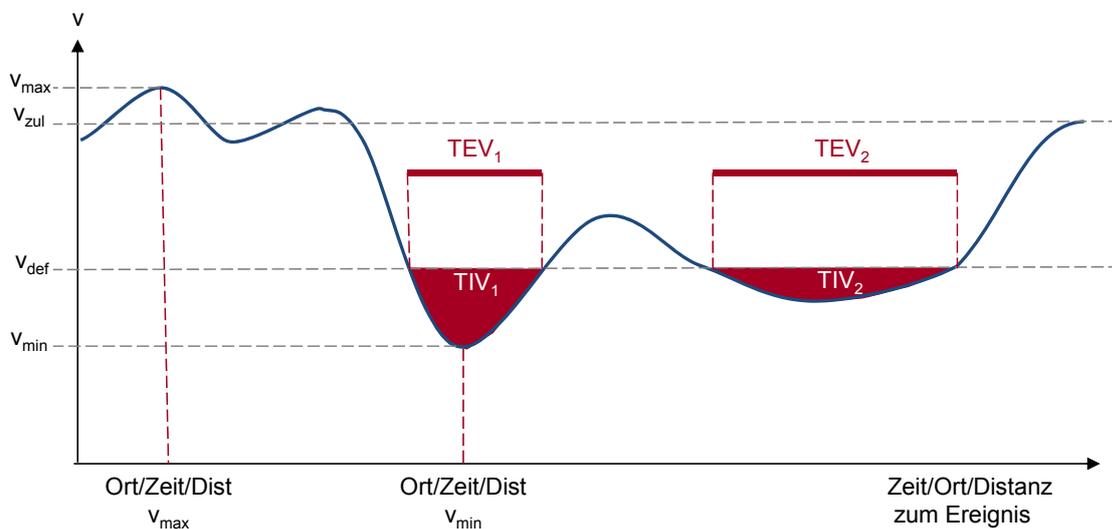


Bild 2-13: Beispiel für den zeitlichen oder räumlichen Verlauf der Geschwindigkeit und deren charakteristischer Werte

Charakteristische Werte sind z. B. minimale Geschwindigkeiten v_{\min} , mittlere Geschwindigkeiten v_{mittel} oder die Streuung der Geschwindigkeiten $\text{Var } v$, jeweils z. B. pro Fahrer oder Fahrzeug, pro Querschnitt, pro Strecke, pro Situation oder pro Intervall aggregiert. (z. B. pro Fahrer/Fahrzeug, pro Querschnitt, pro Strecke, pro Situation, pro Intervall). Die starke Änderung

Die Geschwindigkeit $\max dv$ (i. W. Beginn der Verzögerung) und Distanz zum Ereignisort sind gute Indikatoren für den Reaktionsbeginn. Auch Vergleiche der jeweils zulässigen Geschwindigkeit v_{zul} mit der tatsächlich gefahrenen können gute Aussagen liefern. Die Betrachtung der Expositionsdauer und -stärke Time-Exposed-Defined Velocity (TEV) und Time-Integrated-Defined Velocity (TIV) kann ermitteln, ob z. B. abhängig von Situation und Fahrer-typ eher starke Geschwindigkeitsanpassung über kurzen Zeitraum oder schwache Geschwindigkeitsanpassung über einen langen Zeitraum stattfanden und ob eher gleichmäßige oder schwankende Geschwindigkeiten gefahren werden.

Es gibt keine allgemeingültigen Kritikalitätsschwellen für die Grenze zwischen sicheren und unsicheren Geschwindigkeiten. Während verkehrssicherheitskritischen Situationen wird in der Regel verzögert und die Geschwindigkeiten verringern sich. Für die vergleichende Betrachtung von Expositionsdauer und -stärke könnten als Schwellenwerte Perzentilwerte aus der betrachteten Grundgesamtheit genutzt werden.

Die Geschwindigkeit bzw. das Geschwindigkeitsniveau ist eine zentrale Eingabegröße für die Modellierung des Fahrerverhaltens. Essentielle Eingangsparameter in die Modellierung sind folgende Erkenntnisse: Wann reduzieren die Fahrzeuge bei Gefahr die Geschwindigkeit? Mit welchen Geschwindigkeiten passieren sie den Gefahrenbereich?

Die Geschwindigkeit als Simulationskenngröße stellt durch die direkte Eingabe von angestrebten Geschwindigkeiten der Fahrzeuge eine gute Möglichkeit für die Modellierung dar. Auch hier sind Aussagen über die Intensität wichtig: wie stark reagieren die unterschiedlichen Fahrer, ab wann sollte das Fahrerverhalten angepasst werden? Durch die Analyse der charakteristischen Werte der Geschwindigkeiten können mit Daten aus der Verkehrssimulation Aussagen hinsichtlich der Verkehrssicherheit getroffen werden. Ist das Verhalten des Fahrzeugkollektivs harmonischer? Z. B. im Sinne von: wie sind die Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den Fahrstreifen oder Querschnitten?

Wird die Geschwindigkeit nicht als Stellgröße verwendet, so können die Verteilungen der charakteristischen Werte für die Geschwindigkeit aus der Verkehrssimulation mit denen der Datenbasis (z. B. Straßenverkehr oder Fahrsimulation) als Qualitätskenngröße verglichen werden und so zeigen, wie gut die Nachbildung in der Verkehrssimulation im Vergleich zur Realität ist.

Als weitere Geschwindigkeitskenngröße kann die Darstellung und Untersuchung der Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Fahrzeug und Vorderfahrzeug in Relation zum Abstand eine gute Möglichkeit für Untersuchungen zum Folgeverhalten und zum Erkennen von sog. Reaktionsschwellen sein (siehe auch: Abschnitt 2.4 Fahrermodellierung – Bestehende Modelle und ihre Eignung):

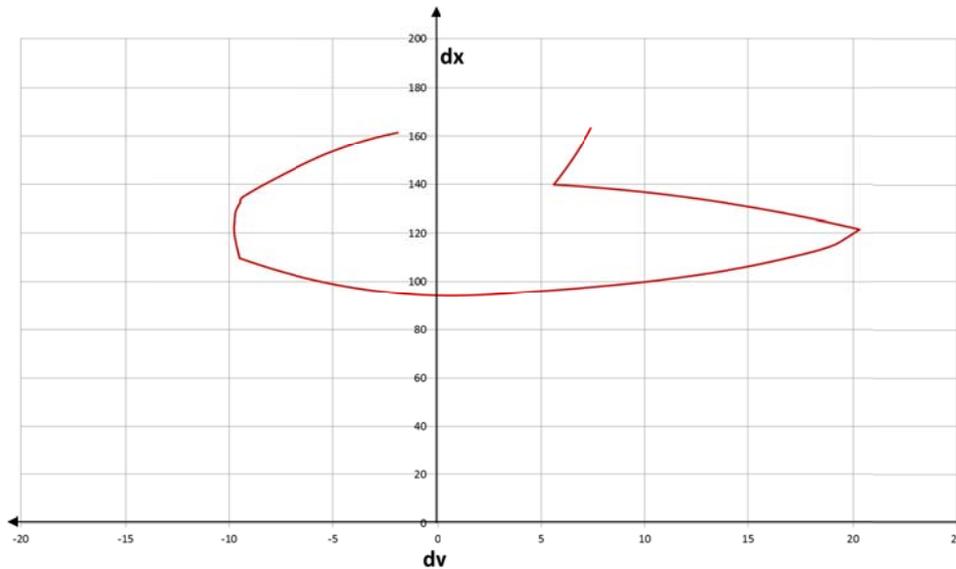


Bild 2-14: Beispiel für die Betrachtung des Verlaufs der Geschwindigkeitsdifferenz dv und den Abstand dx zum Vorderfahrzeug bei einer Folgefahrt

Die Reisegeschwindigkeit v_R ist die Geschwindigkeit, die im Mittel auf einer betrachteten Route erreicht wird. Die Reisezeit t_R ist der Zeitbedarf für das Zurücklegen der betrachteten Route. Die Verlustzeit t_v ist die die Differenz zwischen tatsächlich benötigter Reisezeit und idealer Reisezeit (die theoretische Reisezeit, wenn $v_R = v_{zul}$) [vgl. SPANGLER, 2009].

Nettozeitlücke

Unter der Nettozeitlücke th (oder auch engl. Time Headway) versteht man den zeitlichen Abstand zwischen zwei auf demselben Fahrstreifen hintereinander fahrenden Fahrzeugen.

$$th = \frac{d}{v}$$

v = Geschwindigkeit des betrachteten Fahrzeugs
 d = Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug

Die Erhebung erfolgt fahrzeugseitig (reale Fahrzeuge oder Fahrsimulation oder Verkehrssimulation) mittels entsprechender Abstandssensorik bzw. durch Berechnung. Werte über die Nettozeitlücke können infrastrukturseitig durch Detektoren an Querschnitten ermittelt werden. Vom Detektor wird die Bruttozeitlücke (d. h. der Abstand zwischen den Fronten der beiden Fahrzeuge) gemessen - durch herausrechnen der gemessenen Fahrzeuglänge lässt sich die Nettozeitlücke (Abstand zwischen Heck des vorausfahrenden Fahrzeugs und Front des folgenden Fahrzeugs) ermitteln.

Charakteristische Werte sind z. B. die minimalen Nettozeitlücken th_{min} oder die mittleren Nettozeitlücken th_{mittel} z. B aggregiert pro Fahrer oder Fahrzeug, pro Situation oder pro Intervall. Ebenso geeignet ist die Betrachtung der Expositionsdauer und -stärke beim Unterschreiten

kritischer Nettozeitlücken: Time-Exposed-Critical-Time Headway (TETH) und Time-Integrated-Critical-Time Headway (TITH).

Sinkt die Nettozeitlücke auf einen Wert unterhalb der Reaktionszeit des Fahrers, ist es ihm nicht mehr möglich, angemessen auf Änderungen des Vorfahrenden zu reagieren. Mögliche Kritikalitätsschwellen können daher Zeitlücken unterhalb ca. 1,5 - 2 Sekunden sein [vgl. u. a. STEINHOFF, 2003]. Ein weiterer möglicher Schwellenwert für kritische Nettozeitlücken liegt bei Nettozeitlücken, die kleiner als 0,8 s sind [vgl. u. a. SCHNITTGER, 1991].

Die Analyse als Eingangsgröße kann darüber Aufschluss geben, ob sich z. B. das Abstandsverhalten zum Vorderfahrzeug bei verschiedenen Systemvarianten unterscheidet, also, ob sich beispielsweise die Abstände zum Vorderfahrzeug vergrößern, wenn der Fahrer einen Warnhinweis erhält.

Lassen sich systematische Änderungen im Abstandsverhalten der Fahrzeuge in der sicherheitskritischen Situation erkennen, so sollte dies auch in der Modellierung berücksichtigt werden. Durch die Analyse der charakteristischen Werte der Nettozeitlücke können mit Daten aus der Verkehrssimulation Aussagen hinsichtlich der Verkehrssicherheit getroffen werden. Die Nutzung der absoluten Werte ist dabei ggf. kritisch zu prüfen, aber die relativen Unterschiede zwischen verschiedenen Szenarien und deren Einfluss auf die Verkehrssicherheit können einen guten Einblick in die Wirkung neuer Systeme geben.

Wird die Nettozeitlücke nicht als Stellgröße verwendet, so können die Verteilungen der charakteristischen Werte für die Nettozeitlücke aus der Verkehrssimulation mit denen der Datenbasis (z. B. Straßenverkehr oder Fahrsimulation) als Qualitätskenngröße verglichen werden.

Verwandte Kenngrößen der Nettozeitlücke sind Bruttozeitlücken (d. h. der zeitliche Abstand zwischen den Fronten der beiden Fahrzeuge) und auch Bruttoabstände und Nettoabstände (d. h. der räumliche Abstand zwischen zwei Fahrzeugen).

Time-To-Collision

Die Time-To-Collision (TTC) entspricht der Zeit, die rechnerisch bleibt, bis zwei Fahrzeuge miteinander kollidieren, wenn sie ihre momentane Geschwindigkeit beibehalten:

$$TTC = \frac{d}{\Delta v} \quad \text{mit } \Delta v = v_{ego} - v_{ego-1}$$

v_{ego} = Geschwindigkeit des betrachteten Fahrzeugs

v_{ego-1} = Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs

d = Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug

Die Erhebung erfolgt fahrzeugseitig (reale Fahrzeuge oder Fahrsimulation oder Verkehrssimulation) mittels entsprechender Abstandssensorik bzw. durch Berechnung. Werte über die TTC können infrastrukturseitig durch Detektoren ermittelt werden.

Charakteristische Werte sind z. B. die minimale TTC (TTC_{\min}) oder die mittlere TTC (TTC_{mittel}) aggregiert z. B. pro Fahrer oder Fahrzeug, pro Strecke, pro Situation oder pro Intervall. Ebenso geeignet ist die Betrachtung der Expositionsdauer und -stärke beim Unterschreiten kritischer Nettozeitlücken: Time-Exposed-TTC (TET) und Time-Integrated-TTC (TIT).

In Anlehnung an STEINHOFF [2003] könnten TTC mit Werten kleiner 10 s als kritisch bezeichnet werden und in Anlehnung an VAN DER HORST & HOGEMA [1993] könnten TTC mit Werten kleiner 4 s als kritisch bezeichnet werden.

Die Analyse der Eingangsdaten hinsichtlich TTC kann darüber Aufschluss geben, ob sich z. B. das Abstandsverhalten zum Vorderfahrzeug bei verschiedenen Systemvarianten unterscheidet, also, ob sich beispielsweise die Abstände zum Vorderfahrzeug vergrößern, wenn der Fahrer einen Warnhinweis erhält.

Lassen sich systematische Änderungen im Abstandsverhalten der Fahrzeuge in der sicherheitskritischen Situation erkennen, so sollte dies auch in der Modellierung berücksichtigt werden. Durch die Analyse der charakteristischen Werte der TTC können mit Daten aus der Verkehrssimulation Aussagen hinsichtlich der Verkehrssicherheit getroffen werden. Die Nutzung der absoluten Werte ist dabei ggf. kritisch zu prüfen, aber die relativen Unterschiede zwischen verschiedenen Szenarien und deren Einfluss auf die Verkehrssicherheit können einen guten Einblick in die Wirkung neuer Systeme geben.

Wird das Abstandsverhalten nicht als direkte Stellgröße verwendet, so können die Verteilungen der charakteristischen Werte für die Längsbeschleunigung aus der Verkehrssimulation mit denen der Datenbasis (z. B. Straßenverkehr oder Fahrsimulation) als Qualitätskenngröße verglichen werden.

Verwandte Kenngrößen zur TTC sind z. B. Post-Encroachment Time (PET) und die Initially Attempted Post Encroachment Time (IAPT). Die Post-Encroachment Time (PET) ist bei der Betrachtung eines konfliktmöglichen Ortes die Zeitspanne zwischen dem Verlassen des Konfliktbereichs durch das erste Fahrzeug (z. B. Einbieger) und dem Erreichen des Konfliktbereichs durch das zweite Fahrzeug (z. B. Fahrzeug des Hauptstroms). Die Initially Attempted Post Encroachment Time (IAPT) ist die Zeitspanne zwischen dem Beginn des Passierens eines einbiegenden Fahrzeugs in den konfliktmöglichen Ort zuzüglich der erwarteten Ankunftszeit für ein Fahrzeug des Hauptstroms und dem Ende des Einbiegevorgangs.

Position

Für die Modellierung und Bewertung von Fahrerverhalten in sicherheitskritischen Verkehrssituationen sind Betrachtungen zu den Positionen der Fahrzeuge und der Ereignisse wichtig. Positionsrelevante Betrachtungen können sein:

- Distanzen zwischen betrachtetem Fahrzeug und Ereignisort $Dist$,
- aktueller Fahrstreifen des Ereignisses FS_{ereig} bzw. des betrachteten Fahrzeugs FS_{akt} ,
- und die Position des Fahrzeugs/Ereignisses innerhalb des Fahrstreifens Pos_{FS} .

Diese Informationen liegen je nach Untersuchungsumgebung in unterschiedlicher Granularität vor. Die Distanzen zwischen dem Ereignis und dem betrachteten Fahrzeug können in allen Umgebungen hinreichend genau ermittelt werden. Die Kenntnis des aktuell gefahrenen Fahrstreifens liegt in der Fahr- und Verkehrssimulation vor, während im realen Straßenverkehr aufgrund der Ortungsgenauigkeit meist nicht bekannt ist, auf welchem Fahrstreifen sich das Fahrzeug befindet (oder nur bei speziell ausgerüsteten Fahrzeugen). Je nach Detaillierungsgrad des Fahrsimulators sind zusätzlich noch die genauen Positionen des Fahrzeugs innerhalb des Fahrstreifens vorhanden.

Charakteristische Werte sind z. B. Verteilung der minimalen und mittleren Distanzen zum Ereignis für den Ort des Fahrstreifenwechsels oder für den Reaktionsbeginn (z. B. Verzögern) sowie die Betrachtung der Standardabweichung der lateralen Position innerhalb des Fahrstreifens: wie stark schwankt die Fahrzeugposition innerhalb des Fahrstreifens?

Verwandte Kenngrößen der Fahrzeugposition sind z. B. die Standard Deviation of Lateral Position (SDLP), die Standardabweichung der Position innerhalb des Fahrstreifens.

Zusätzlich ist es wichtig, die Untersuchungssituationen zu beschreiben und bei der Auswertung die jeweiligen Randbedingungen entsprechend zu berücksichtigen. Folgende Bereiche sollten dabei bedacht werden:

- Verkehrszustände und Verkehrsnachfrage,
- Verkehrsinfrastruktur (Straßenkategorie, Straßengeometrie, Anzeige- oder Steuerungseinrichtungen),
- Umwelteinflüsse (Witterung und Sichtbedingungen),
- zulässige Geschwindigkeiten und
- Spezielle Gegebenheiten des Untersuchungsszenarios (wie z. B. Baustellen, Fahrstreifenreduktionen, Unfälle, Stauenden).

Überblick

Die folgende Tabelle fasst die wesentlichen Ergebnisse der vorherigen Abschnitte kurz zusammen und gibt eine vergleichende Übersicht über die vorgestellten Kenngrößen.

Tabelle 2-1: Überblick über potenzielle Kenngrößen zur Verkehrssicherheit

	Verfügbarkeit				Charakteristische Größen	Mögliche Kritikalitätsschwellen	Abgeleitete Kenngrößen; z. B.:
	Feld Fzg	Feld Infra	FSIM	VSIM			
Längsbeschleunigung	+	-	+	+	<ul style="list-style-type: none"> ▪ a_{x_min} ▪ a_{x_mittel} ▪ $\max da_x$ ▪ TED, TID 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $< -4.5 \text{ m/s}^2$ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ DR
Querbeschleunigung	+	-	+	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ a_{y_max} 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $> 1,5 \text{ m/s}^2$ ▪ $> 2 \text{ m/s}^2$ 	
Geschwindigkeit	+	+	+	+	<ul style="list-style-type: none"> ▪ v_{min} ▪ v_{mittel} ▪ $\text{Var } v$ ▪ $\max dv$ ▪ v/ v_{zul} ▪ TEV, TIV 	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ dv/dx ▪ v_R ▪ t_R ▪ t_v
Nettozeitlücke	+	+	+	+	<ul style="list-style-type: none"> ▪ t_{h_min} ▪ t_{h_mittel} ▪ TETH, TITH 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $< 1,5 - 2 \text{ s}$ (gefährlich) ▪ $< 0,8 \text{ s}$ (kritisch) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bruttozeitlücken ▪ Bruttoabstände ▪ Nettoabstände
TTC	+	o +	+	+	<ul style="list-style-type: none"> ▪ TTC_{min} ▪ TTC_{mittel} ▪ TET, TIT 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $< 10 \text{ s}$ ▪ $< 4 \text{ s}$ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ET ▪ PET ▪ IAPT ▪ TTA
Position Position auf Fahrstreifen	+	o	+	+	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dist ▪ FS_{ereig} ▪ FS_{akt} ▪ Pos_{FS} 	▪	<ul style="list-style-type: none"> ▪ SDLP ▪ TLC
	o	-	+	o			
	-			-			

Fzg: fahrzeugseitig

FSIM: Fahrsimulation

VSIM: Verkehrssimulation

Infra: infrastrukturseitig

+: sehr gut

o: mittelmäßig/schlecht

-: nicht verfügbar

2.3.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Der Einblick in das Unfallgeschehen zeigt, dass nähere Betrachtungen des regelkonformen und fehlerbehafteten Fahrerverhaltens in den Bereichen Längsverhalten (Geschwindigkeitswahl und Abstand) und Querverhalten (Fahrstreifenwechselfverhalten) notwendig sind.

Die Ursachen für das Unfallgeschehen sind vielfältig. Unfallentstehungsmodelle geben Aufschluss über die komplexen Zusammenhänge, die zur Entstehung von Unfällen führen. Für die simulative Wirkungsermittlung von neuartigen ITS und FAS ist die Betrachtung von Unfäl-

len wenig geeignet, da Unfälle sehr seltene Ereignisse sind. Auch die Modellierung von menschlichem Fehlverhalten in ihren originären Ursachen, wie z. B. Einschätzungsfehler, ist für die vorliegende Fragestellung viel zu komplex. Es fehlt die umfassende Datengrundlage für die Modellierung auf dieser Detailebene. Vielmehr wird es als sinnvoll erachtet, die Wirkungen dieses menschlichen Fehlverhaltens in der Verkehrssimulation abzubilden, also z. B. den verspäteten Reaktionsbeginn oder die nicht der Situation angepasste Geschwindigkeit.

Für die simulative Wirkungsermittlung von ITS und FAS ist die Nutzung der Ersatzkenngrößen geeignet, da sie einen indirekten Einblick in die Wirkung auf die Verkehrssicherheit geben. Die dafür notwendigen Eingangsgrößen für die Modellierung von Längs- und Querverhalten und entsprechende Ausgabegrößen aus der Verkehrssimulation sind vorhanden. Teilweise sind auch gängige Kritikalitätsschwellen in der Literatur vorhanden. Auch die Verwendung von Expositionsdauer und -intensität kann gute Aussagen hinsichtlich der Wirkung liefern.

2.4 Fahrermodellierung – Bestehende Modelle und ihre Eignung

In diesem Abschnitt werden relevante Hintergründe zur Modellierung von Fahrerverhalten in mikroskopischen Verkehrssimulationen gesammelt. Bestehende Ansätze zur Fahrermodellierung werden vorgestellt und auf Eignung zur Modellierung sicherheitskritischer Situationen geprüft. Es werden die regelkonforme und die fehlerbehaftete Modellierung in Längs- und Querrichtung betrachtet. Die Nutzbarkeit der zuvor definierten Kenngrößen wird überprüft. Dieser Abschnitt ist gemäß Bild 2-15 in die vorliegende Arbeit eingebettet:

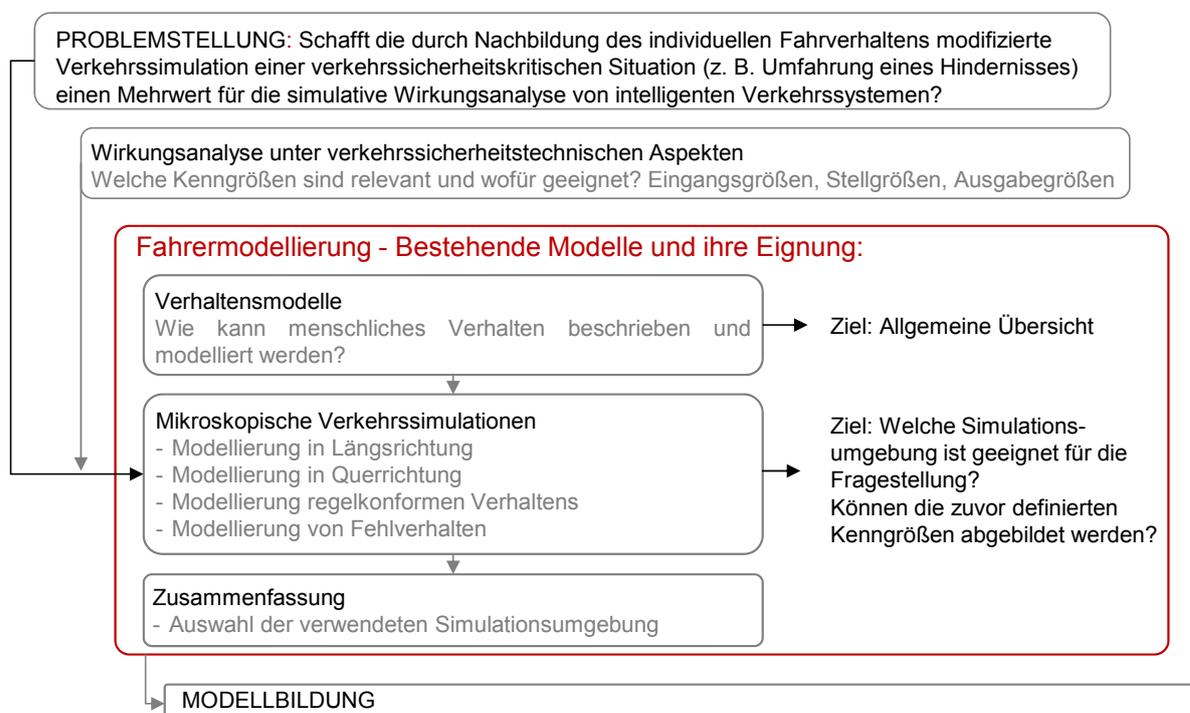


Bild 2-15: Aufbau des Abschnitts 2.4 und Einbettung in die Struktur der Arbeit

Ein Modell ist die Abstraktion der Wirklichkeit auf bestimmte Erfordernisse der Analyse. Mit Verkehrssimulationsmodellen sollen Verhalten und Zusammenspiel der Verkehrsteilnehmer oder gesamtverkehrliche Betrachtungen nachgebildet werden. Bei der Modellbildung müssen Vereinfachungen vorgenommen werden, um das Modell handhabbar zu gestalten. Andererseits muss das Modell wiederum so detailliert sein, dass die für diese Untersuchung wesentlichen Eigenschaften im Modell valide abgebildet sind.

Verkehrliche Simulationsmodelle werden je nach Detaillierungsgrad in makroskopische, mikroskopische und submikroskopische Simulationsmodelle, sowie verschiedene Verknüpfungen dieser, unterschieden. Simulationsmodelle basieren auf dem Zusammenwirken einzelner Teilmodelle. Dazu gehört ein Netzmodell, dieses enthält die für die Simulation relevanten Informationen über die Netzinfrastruktur des Untersuchungsgebiets, z. B. Anzahl Fahrstreifen, Knotenpunkte und Steuereinrichtungen. Verkehrszustände werden basierend auf Verkehrsnachfragemodellen modelliert [vgl. auch FGSV, 2006].

In *makroskopischen* Modellen erfolgt die Modellierung auf einem hohen Abstraktionslevel und ohne die Abbildung von Einzelfahrzeugen. Dieser Ansätze liefern lokal aggregierte Kenngrößen wie Verkehrsdichten, -stärken oder mittlere Geschwindigkeiten. Diese Ansätze bieten zu wenige Details für die Modellierung und Bewertung von Fahrerverhalten in sicherheitskritischen Situationen.

In *submikroskopischen* Modellen wird das Verhaltensmodell von Fahrer und Fahrzeug bis zur detaillierten Modellierung des Fahrzeugs z. B. mit Einfluss des Motors oder der Reifen heruntergebrochen. Das Fahrerverhalten kann bis hin zur Stellung von Gaspedal, Lenkung und Gangwahl modelliert werden.

In der *mikroskopischen* Verkehrssimulationen werden individuelle Eigenschaften einzelner Fahrzeuge und Fahrer, sowie die Interaktionen der Fahrzeuge untereinander nachgebildet, jedoch nicht so detailliert wie in submikroskopischen Modellen. Das Fahrerverhalten wird meist in verschiedenen mathematischen Verhaltensmodellen abgebildet. Typische Verhaltensmodelle sind: Fahrzeugfolgemodelle, Fahrstreifenwechselmodelle und Routenwahlmodelle. Fahrerassistenzsysteme beeinflussen das Fahrerverhalten auf jeder der drei genannten Modellierungsebenen.

Das Fahrzeugfolgmodell legt das Abstandsverhalten und die Interaktion zweier aufeinander folgender Fahrzeuge fest. Das Fahrstreifenwechselmodell legt fest, nach welchen Regeln die Fahrzeuge einen Fahrstreifenwechsel durchführen. Das Routenwahlmodell bestimmt die Route eines Fahrzeugs durch das Streckennetz. Route bezeichnet eine feste Folge von Strecken und Verbindungen zwischen einem Ausgangs- und Zielort.

Basisdaten und Algorithmik der Verhaltensmodelle werden innerhalb des Verkehrssimulationsmodells durch Parameter eingestellt. Mit diesen kann das Modell an die jeweilige Aufgabe angepasst werden. Folgende Parameter werden verwendet:

- Parameter zur Beschreibung des Verhaltens der Verkehrsteilnehmer (z. B. Wunschgeschwindigkeit und Reaktionsvermögen) und
- Parameter zur Beschreibung der Fahrzeuge (z. B. Länge und maximale Geschwindigkeit).

Beide Parameterarten können als stochastische Größen durch Häufigkeitsverteilungen im Modell berücksichtigt werden.

Das Simulationsergebnis hängt stark von den verwendeten Parametern ab. Für die meisten Modelle existieren standardisierte Parametersätze, die in vielen Fällen (oder als Näherung) für die jeweilige Aufgabe verwendet werden können. Es sollte jedoch bei jeder Untersuchung geprüft werden, ob die Standardparameter plausibel sind und realistischen Ergebnissen führen.

2.4.1 Verhaltensmodelle

Ein komplexer Aspekt bei der mikroskopischen Modellierung des Straßenverkehrs sind die Fahrer und ihr Verhalten:

„Das wesentliche Merkmal des Straßenverkehrs ist die Entscheidungsfreiheit des Fahrers; sie ist in allen Zustandsformen mehr oder weniger immer vorhanden. Unterschiedliche Verhaltensweisen der Fahrer in Fahrzeugen, die ihrerseits sehr verschiedene Eigenschaften besitzen, erzeugen einen Bewegungsablauf, der sich dem außenstehenden Beobachter als ein zufälliger Prozess darbietet.“ [WIEDEMANN, 1974]

DILLING [1973] beschreibt den Fahrprozess als einen Regelkreis mit den Komponenten Fahrer (Regler, R), Fahrzeug (Regelstrecke, RS) und Straße bzw. Umfeld (Führungsgrößen, W):

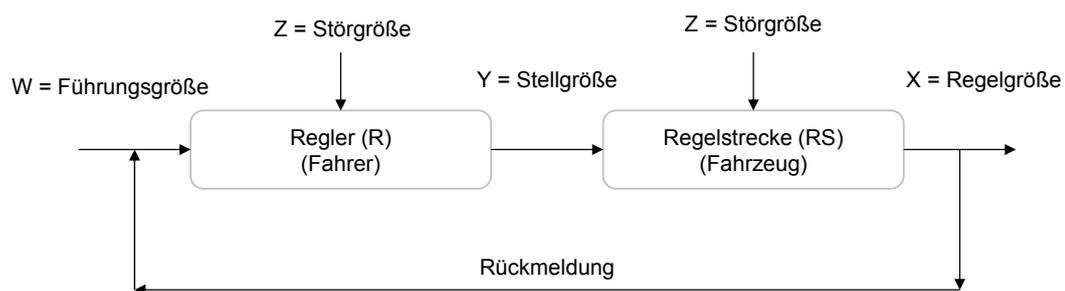


Bild 2-16: Regelkreis Fahrer - Fahrzeug - Straße bzw. Umfeld nach DILLING [1973]

Die Regelgröße des Systems ist die Fahrweise, die Stellgrößen sind die Längsregelung (Bremsen, Beschleunigen) und die Querverregelung (Lenken). Der Fahrer regelt die Teilgrößen (Geschwindigkeit, Fahrstreifen, -lage) basierend auf den ihm verfügbaren Informationen und erhält Rückmeldung durch das Fahrzeug. Der Fahrer korrigiert sein Verhalten sobald sich seine Fahrersituation ändert.

RASMUSSEN [1982] unterteilt die Fahraufgabe in drei Ebenen:

- wissensbasiertes Verhalten,
- regelbasiertes Verhalten und
- fertigkeitbasiertes Verhalten.

MICHON [1985] gliedert die Fahraufgabe sehr ähnlich zu Rasmussen, allerdings unterscheidet er vier hierarchisch gegliederte Ebenen (siehe Bild 2-17):

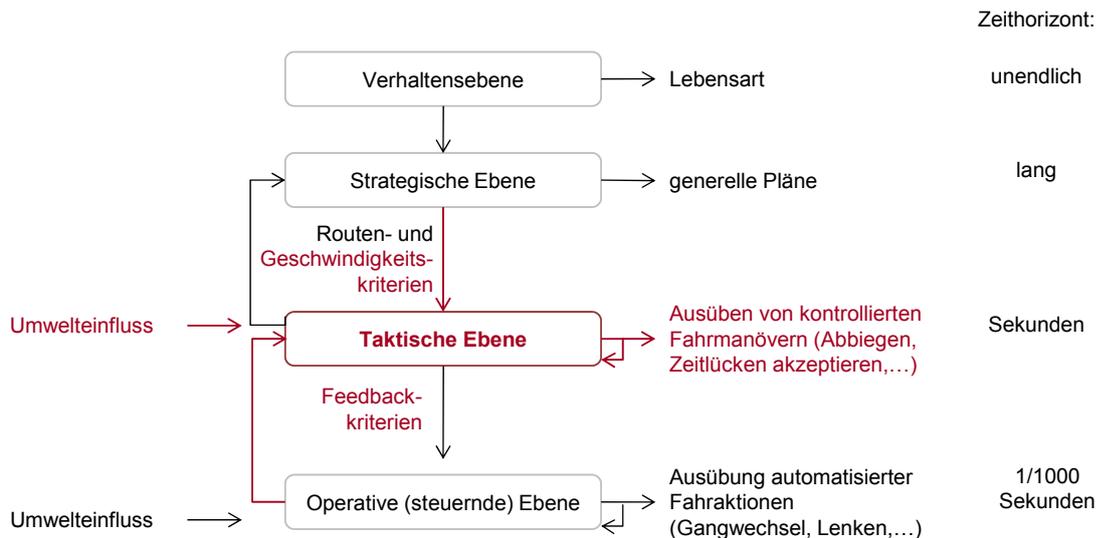


Bild 2-17: Hierarchische Struktur der Fahraufgaben, eigene Darstellung nach MICHON [1985]

Die Verhaltens-ebene beschreibt die allgemeine Lebensart. Auf der strategischen Ebene oder Navigationsebene werden generelle Pläne formuliert, die die Randbedingungen für Fahrten und Routenentscheidungen bilden und damit die folgenden Ebenen stark beeinflussen. Die taktische Ebene (im Original „Manoeuvring level“) oder auch Führungsebene umfasst die Ausübung von bewussten und kontrollierten Fahrmanövern (wie z. B. Abbiegen), die Fahrtroute wird umgesetzt, die Fahrweise wird der vorliegenden Situation angepasst. Auf der operativ steuernden Ebene oder auch Stabilisierungsebene finden die meist unbewusst durchgeführten Fahraktionen wie Gangwechsel und Lenken für die Spurhaltung statt.

Das folgende Bild 2-18 kombiniert beide Strukturen, wobei die Grenzen in der Zuordnung sicherlich nicht strikt, sondern eher fließend sind. Für die vorliegende Fragestellung ist die nähere Betrachtung der taktischen Ebene, der Führungsebene, entscheidend, da sich hier die entscheidenden Prozesse für das Verhalten in verkehrssicherheitskritischen Sondersituationen abspielen. Die detaillierte Betrachtung der Prozesse auf der operativ steuernden bzw. fertigkeitbasierten Verhaltens-ebene sind zu kleinteilig für die Beantwortung der Frage nach der Wirkung zukünftiger Assistenzsysteme. Die Wirkungen dieser Prozesse wird aber selbstverständlich betrachtet: also z. B. der neue Fahrstreifen nach Lenkmanöver bzw. die resultierende Beschleunigung oder Geschwindigkeit unabhängig vom Gangwechsel.

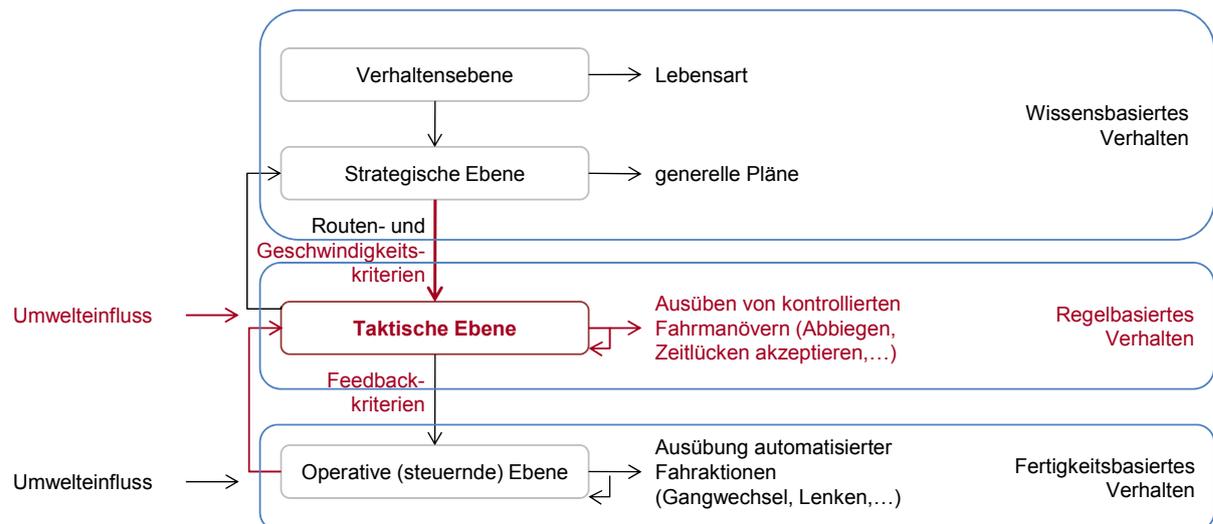


Bild 2-18: Hierarchische Struktur der Fahraufgaben, Kombination der Gliederungen nach MICHON 1985 (links) und RASMUSSEN 1982 (rechts)

Das Fahrerverhaltensmodell von RUMAR [1985] unterteilt die taktische oder operative Ebene in die Prozesse „Wahrnehmung“ (Perception), „Entscheidungsfindung“ (Decision-Making) und „Aktion“ (Action). Zusätzlich beinhaltet dieses Modell mögliches Fahrerfehlverhalten bei den jeweiligen Prozessen. Auf der Wahrnehmungsebene sind dies z. B. Fehleinschätzungen von Geschwindigkeit oder Distanz bzw. Sichteinschränkungen oder komplexe Umfeldbedingungen. Bei der Entscheidungsfindung können mögliche Fehler durch z. B. Erfahrung oder falsche Erwartungen bzw. Unaufmerksamkeit bedingt sein. Auf der Aktionsebene können Reaktionsverzögerungen oder falsche Fahrzeughandlungen aber auch die Fahrzeugcharakteristiken zu Fehlern führen.

Entscheidend für die Modellierung und simulative Wirkungsermittlung von Fahrerverhalten in verkehrssicherheitskritischen Situationen ist, dass die simulierten Fahrer Fehler machen, d. h. dass sie sich nicht immer ideal verhalten. Das Modell von Rumar verdeutlicht auch, wie solche Fahrfehler entstehen können: verspätete oder falsche Wahrnehmung der Situation oder eine falsche bzw. unangepasste Entscheidung bzw. Handlung. Für diese komplexen Prozesse gibt es sehr wenige Daten und auch Möglichkeiten der Datenerhebung. Allerdings kann die daraus entstandene Reaktion am Fahrerverhalten gemessen werden, z. B.: wann reagieren die Fahrer: früh oder spät? Wie reagieren die Fahrer: stark oder schwach?

Auch wenn sich im Zusammenhang mit der vorliegenden Fragestellung die Modellierung und Analyse auf die Wirkung des evtl. fehlerbehafteten Fahrerverhaltens (z. B. Fahrer reagieren spät und bremsen stark) beschränkt, die Kenntnis der Ursache - also möglicher Wahrnehmungs- und auch Handlungsfehler - ist wichtig. Diese Kenntnis führt zu Annahmen über das Fahrerverhalten in den geplanten Untersuchungssituationen und führt dann zur detaillierten Untersuchung der mikroskopischen Datenbasis hinsichtlich der entsprechenden Reaktion wie z. B.: wann bremsen die Fahrer? Welche Geschwindigkeit besitzen sie am Ereignisort?

2.4.2 Modellierung in Längsrichtung

Mikroskopische Fahrzeugfolgemodelle beschreiben das Fahrerverhalten einzelner Fahrer-Fahrzeug-Einheiten. Die ersten Fahrzeugfolgemodelle wurden in den 1950ern von *Reuschel* und *Pipes* entwickelt. Die Geschwindigkeit des betrachteten Fahrzeugs basiert auf einer Funktion der Fahrzeugabstände zwischen zwei Fahrzeugen. Die Zeitlücke zwischen den betrachteten Fahrzeugen soll einen definierten Wert nicht unterschreiten. *Chandler, Herman und Montroll* berücksichtigten die Reaktionsdauer der Fahrer. Es ergibt sich eine Aktion des Fahrers, die von der Sensitivität des Fahrers und einem Stimulus (z. B. der Geschwindigkeitsdifferenz) abhängig ist. Diese Kategorie der Fahrzeugmodelle wird als *Stimulus-Response-Modelle* bezeichnet. Eine Übersicht über diese Modelle findet sich u. a. in [DETERING, 2011].

Weitere Gruppen der Fahrzeugfolgemodelle bilden neben den

- Stimulus-Response-Modellen (z. B.: *Reuschel* und *Pipes*)
- die Safety-Distance-Modelle (z. B.: *Gipps* und *Krauss*) und
- die Psycho-physischen bzw. Action-Point Modelle (z. B.: *Wiedemann* und *Fritzsche*),
- sowie Zellularautomaten (z. B.: *Nagel-Schreckenberg*)

auf die im Folgenden detaillierter eingegangen wird.

2.4.2.1 Gipps

Das Gipps Modell [GIPPS, 1981] gehört zu der Gruppe der „Safety-Distance“-Modelle (auch Collision Avoidance Modelle). Sie basieren auf der Einhaltung eines sicheren Folgeabstands, so werden Kollisionen mit dem Vorderfahrzeug vermieden. Das Gipps Modell arbeitet mit „Performance-Grenzen“ des Fahrzeugs und des Fahrers, die dazu benutzt werden, eine sichere Geschwindigkeit für die jeweilige Fahrer-Fahrzeug-Einheit zu berechnen. Der Fahrer wählt in dem Modell seine Geschwindigkeit so, dass er sicher anhalten kann, falls das Vorderfahrzeug mit seiner maximalen Verzögerung zum Stehen kommt. Um diesen sicheren Abstand einzuhalten, schätzt der nachfolgende Fahrer die maximale Verzögerung des vorausfahrenden Fahrzeugs. Unterschätzt der Fahrer die maximale Verzögerung des Vorderfahrzeugs, kann er stärker als eigentlich gewünscht verzögern und die Simulation bleibt auch in diesem Fall unfallfrei.

$$v_n(t + \tau) = \min \left\{ \begin{array}{l} v_n(t) + 2.5a_n\tau \left(1 - \frac{v_n(t)}{V_n}\right) \sqrt{\left(0.025 + \frac{v_n(t)}{V_n}\right)}, \\ b_n \tau + \sqrt{b_n^2 \tau^2 - b_n \left(2[x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] - v_n(t)\tau - \frac{v_{n-1}(t)^2}{\hat{b}}\right)} \end{array} \right\}$$

- a_n maximale Wunschbeschleunigung des Fahrers von Fahrzeug n
 b_n maximale Wunschverzögerung des Fahrers von Fahrzeug n

s_n	effektive Fahrzeuglänge des Fahrzeugs n (Fahrzeuglänge plus Abstand, den das Folgefahzeug nicht unterschreitet)
V_n	Wunschgeschwindigkeit des Fahrers von Fahrzeug n
\hat{b}	vom Fahrer in n geschätzte maximale Wunschverzögerung des Fahrzeugs n-1
$x_n(t)$	Position der Fahrzeugfront des Fahrzeugs n zum Zeitpunkt t
$v_n(t)$	Geschwindigkeit des Fahrzeugs n zum Zeitpunkt
τ	Reaktionsdauer des Fahrers

2.4.2.2 Krauß

Das Modell von KRAUß [1998] gehört ebenso zur Gruppe der „Safety-Distance“-Modelle und verwendet den gleichen Ansatz wie Gipps. In jedem Zeitschritt wird die Geschwindigkeit der Fahrer-Fahrzeug-Einheiten an die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs angepasst, sodass ein kollisionsfreies Fahrerverhalten erreicht wird [vgl. auch: KRAJZEWICZ et al., 2002].

Diese sogenannte „sichere Geschwindigkeit“ $v_{safe}(t)$ berechnet sich zu:

$$v_{safe}(t) = v_l(t) + \frac{g(t) - v_l(t)\tau}{\frac{\bar{v}}{b(\bar{v})} + \tau}$$

$v_l(t)$:	Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs
$g(t)$:	Lücke zum Vorderfahrzeug
τ :	Reaktionszeit des Fahrers (i.d.R.: 1 Sekunde)
b :	Verzögerungsfunktion

Um die Beschleunigung im fahrzeugmöglichen Bereich zu halten, wird die resultierende Wunschgeschwindigkeit als das Minimum der sicheren Geschwindigkeit, der maximalen Geschwindigkeit und der aktuellen Geschwindigkeit plus der maximalen Beschleunigung berechnet. Fehlerbehaftetes Fahrerverhalten wird simuliert, indem ein zufällig erzeugter Fehlerterm von der Wunschgeschwindigkeit abgezogen wird.

$$v_{des}(t) = \min[v_{safe}(t), v(t) + a, v_{max}]$$

$$v(t) = \max[0, rand[v_{des}(t) - \epsilon a, v_{des}(t)]]$$

Das Modell von Krauß zielt auf die simulative Abbildung von Stau und Untersuchung makroskopischer Fragestellungen und ist auch daraufhin validiert.

2.4.2.3 Wiedemann

In den Safety-Distance-Modellen wird davon ausgegangen, dass die Fahrer-Fahrzeug-Einheiten sogar auf sehr kleine Geschwindigkeitsdifferenzen zum Vorderfahrzeug reagieren, und dies auch unabhängig davon, wie groß der Abstand zum Vorderfahrzeug ist. Das Modell von WIEDEMANN [1974] ist ein Vertreter der psycho-physischen Modelle. Psycho-physische Modelle arbeiten mit Wahrnehmungsgrenzen. In der Modellierung nach Wiedemann wird zwischen beeinflusstem und unbeeinflusstem Fahren unterschieden.

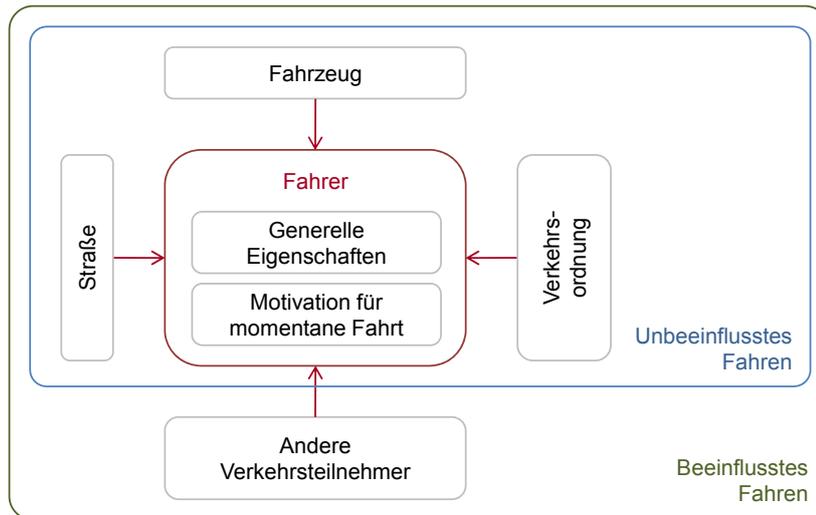


Bild 2-19: WIEDEMANN [1974]: Abgrenzung der Begriffe beeinflusstes und unbeeinflusstes Fahren

„Ein wesentliches Merkmal des Entscheidungsprozesses eines Fahrers liegt darin, dass die Wahl einer bestimmten Handlungsalternative nur mit sehr unvollständiger Information darüber erfolgt, wie seine momentane Umwelt augenblicklich objektiv auf ihn einwirkt; dies gilt in besonderem Maße für die Handlungen der übrigen Verkehrsteilnehmer.

Daher können a priori nur solche mikroskopische Modelle des Verkehrsflusses den Anspruch auf Wirklichkeitsäquivalente Nachbildung der Wirklichkeit erheben, die dieser unvollständigen und zeitlich verzögerten Informationsübermittlung Rechnung tragen und zudem berücksichtigen, dass Informationen für einen Fahrer überhaupt existent sind, wenn sie bei ihm gewisse Reizschwellen überschritten haben.“ [WIEDEMANN, 1974, S. 9-10]

Im unbeeinflussten Fahren gibt es keinen Einfluss durch vorausfahrende Fahrzeuge, die Fahrer-Fahrzeug-Einheiten versuchen ihre jeweilige Wunschgeschwindigkeit zu erreichen und beizubehalten. Im Bild 2-20 ist eine beispielhafte Trajektorie für das beeinflusste Fahrerverhalten dargestellt. Das Modell basiert darauf, dass der Fahrer eines schnelleren Fahrzeuges bei Erreichen seiner individuellen Wahrnehmungsschwelle das langsamere vorausfahrende Fahrzeug erkennt und zu bremsen beginnt. Der Fahrer im Folgefahrzeug kann die Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs nicht ganz genau einschätzen, so dass er zu stark verzögert und die Geschwindigkeit sinkt unter die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeuges. Wird eine andere Wahrnehmungsschwelle erreicht, beginnt das Fahrzeug wieder leicht zu beschleunigen. So wird das kontinuierliche Anpassen der Geschwindigkeit im Folgevorgang abgebildet. Durch individuelle Wahrnehmungsschwellen, die durch stochastische Verteilungsfunktionen abgebildet werden, werden unterschiedliche Fahrerverhalten modelliert [WIEDEMANN, 1974; PTV AG, 2012].

Für jeden in Bild 2-20 dargestellten Fahrzustand (unbeeinflusstes Fahren, Annäherung, Folgen, Bremsen) wird eine Beschleunigung für das jeweilige Fahrzeug berechnet. Diese ergibt sich aus der aktuellen Geschwindigkeit, der Geschwindigkeitsdifferenz und dem Abstand zum Vorderfahrzeug sowie den individuellen Kenngrößen von Fahrer und Fahrzeug.

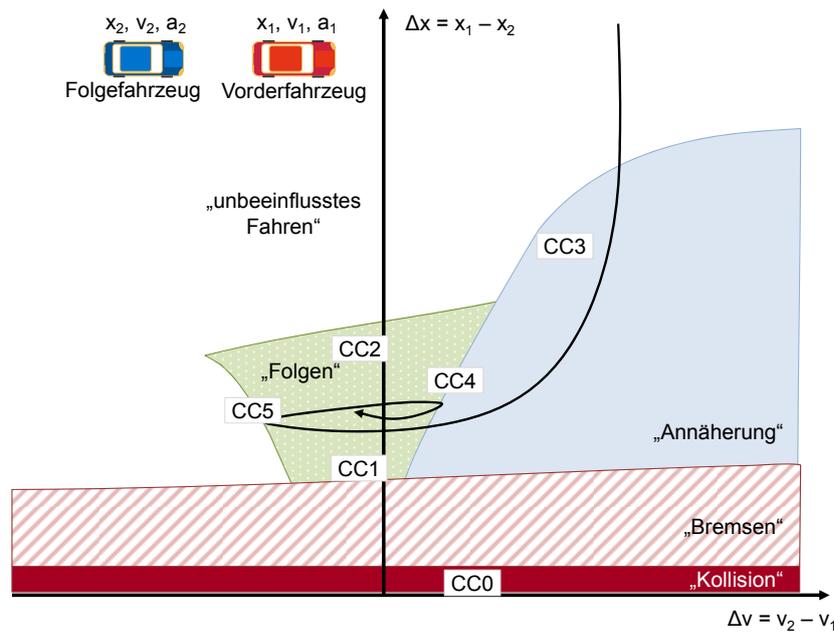


Bild 2-20: Prinzip des Fahrzeugfolgmodells nach Wiedemann 1974 und 1999, vgl. PTV AG [2012]

Der Fahrer wechselt den Fahrzustand, sobald er eine bestimmte Wahrnehmungsschwelle erreicht. Diese Schwellen sind variabel und abhängig von der jeweils gefahrenen Geschwindigkeit und dem Abstand; es können nur bei geringen Abständen geringe Geschwindigkeitsdifferenzen wahrgenommen werden. Auf große Geschwindigkeitsunterschiede wird wesentlich früher reagiert.

Folgende Schwellen können parametrisiert werden, um die empirisch beobachtete Oszillation bei der Folgefahrt abzubilden [vgl.: WIEDEMANN, 1974; PTV AG, 2012]:

- CC0: gewünschter, durchschnittlicher Bruttoabstand beim Stillstand
- CC1: gewünschter, minimaler zeitlicher Abstand, den ein Fahrer bei einer bestimmten Geschwindigkeit zum Vorderfahrzeug halten möchte. Je vorsichtiger der Fahrer ist, desto höher ist der Wert $dx_{safe} = CC0 + CC1 \cdot v$.
- CC2: gewünschter, maximaler Abstand. Bei größeren Abständen, verringert das Folgefahrzeug diese wieder
- CC3: ist die Wahrnehmungsschwelle für den Beginn des Verzögerns, ab dieser Schwelle erkennt ein Fahrer ein langsamerer Vorderfahrzeug
- CC4: ist die Wahrnehmungsschwelle für Geschwindigkeitsdifferenzen im Folgen bei abnehmenden Abständen
- CC5: ist die Wahrnehmungsschwelle für Geschwindigkeitsdifferenzen im Folgen bei zunehmenden Abständen
- CC6: beschreibt den Einfluss des Abstandes auf die Oszillation der Geschwindigkeit während des Folgevorgangs. Der Wert 0 bewirkt, dass die Oszillation unabhängig vom Abstand ist, während große Werte eine größere Oszillation der Geschwindigkeit mit zunehmendem Abstand bewirken.
- CC7: Die Beschleunigung während der Oszillation
- CC8: Wunschbeschleunigung aus dem Stillstand
- CC9: Wunschbeschleunigung bei 80 km/h

2.4.2.4 Fritzsche

Fritzsches Fahrzeugfolgemodell [FRITZSCHE, 1994] basiert auf dem gleichen Ansatz wie das Modell von Wiedemann. Er unterteilt das Modell allerdings in fünf Fahrzustände: Freies Fahren, Folgen I, Folgen II, Annähern und Gefahr, die sich aus verschiedenen Bereichen im Verhältnis aus Abstand und Differenzgeschwindigkeit ergeben (siehe Bild 2-21).

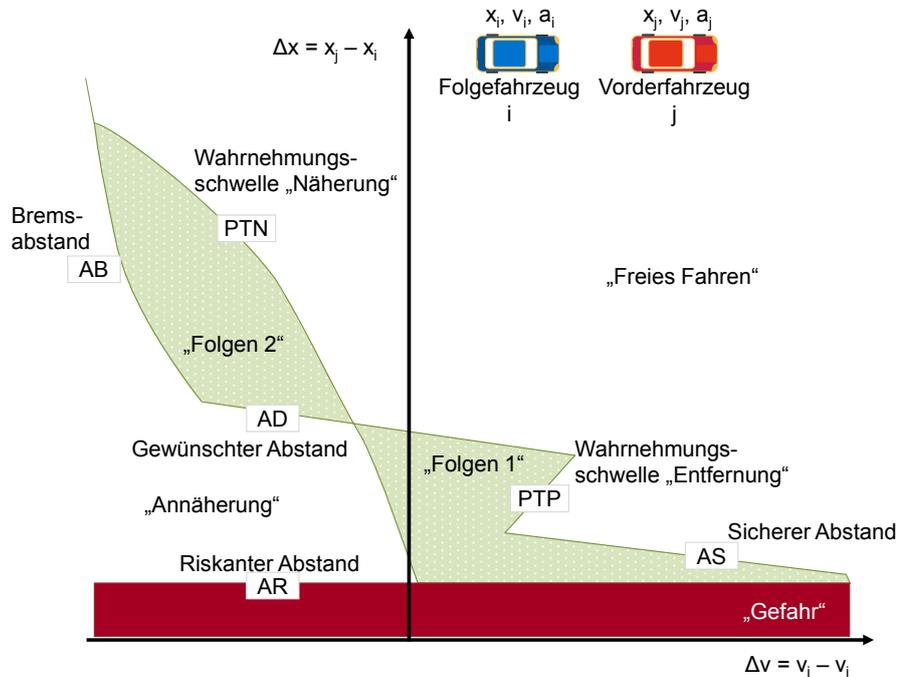


Bild 2-21: Prinzip des Fahrzeugfolgemodells nach FRITZSCHE [1994]

Bei der Interpretation muss beachtet werden, dass im Modell nach FRITZSCHE die Differenzgeschwindigkeit aus der Differenz von Vorderfahrzeug zur Folgefahrzeug gebildet wird, für eine Annäherung ergeben sich negative Werte. Wiedemann berechnet die Differenzgeschwindigkeit als Differenz aus Folgefahrzeuggeschwindigkeit und Vorderfahrzeuggeschwindigkeit, für eine Annäherung ergeben sich positive Werte.

2.4.2.5 Nagel-Schreckenberg

Das NAGEL-SCHRECKENBERG-Modell [1992] gehört zu der Gruppe der Zellularautomaten. In der originären Version wird das Verkehrsnetz in gleichlange Segmente (mit der Länge 7,5 m) unterteilt. In jedem Rechenschritt wird ermittelt, welches Fahrzeug sich in welchem Segment befindet. Die Fahrzeugbewegung wird mit Hilfe von vier Regeln simuliert, die in dieser Reihenfolge pro Fahrzeug geprüft werden:

- 1) Beschleunigen: alle Fahrzeuge haben den Wunsch, so schnell wie erlaubt oder möglich zu fahren und mit einer normierten Geschwindigkeit v , die kleiner als die maximale Geschwindigkeit v_{max} ist und beschleunigen um eine Geschwindigkeitseinheit $v_1 = v + 1$.

- 2) Abbremsen: damit keine Unfälle geschehen und um die Interaktionen zwischen den Fahrzeugen abzubilden, wird geprüft, ob der Abstand Δs eines Fahrzeugs zum Vorderfahrzeug kleiner ist als seine momentane Geschwindigkeit v_1 ($\Delta s \leq v_1$). Sonst wird das Fahrzeug auf die neue Geschwindigkeit $v_2 = \Delta s - 1$ gebremst.
- 3) Trödeln: Schwankungen in der Wunschgeschwindigkeit, Bremsreaktion oder Beschleunigung werden nachgebildet, indem die Fahrzeuggeschwindigkeit mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit p um den Wert 1 verringert wird $v_3 = v_2 - 1$.
- 4) Fahren: Jedes Fahrzeug wird um v_3 Plätze weiterbewegt.

Dieser Modellansatz ermöglicht die rechenzeitoptimierte Betrachtung großer Verkehrsnetze. Inzwischen wurde das Modell weiterentwickelt, z. B. die Segmentlänge wurde auf 1,5 m herabgesetzt oder der Trödelfaktor wurde geschwindigkeitsabhängig integriert.

2.4.3 Modellierung in Querrichtung

Neben der Modellierung in Längsrichtung beinhalten mikroskopische Verkehrssimulationen auch Modelle für die Modellierung in Querrichtung. Diese Zusammenstellung beschränkt sich auf die Modellierung von Fahrstreifenwechseln und nicht auf die Position innerhalb eines Fahrstreifens. Es wird näher auf die Fahrstreifenwechselmodelle eingegangen, die von den meistverbreiteten mikroskopischen Verkehrssimulationswerkzeugen verwendet werden.

In den Modellen wird zwischen zwei Arten von Fahrstreifenwechseln unterschieden:

- notwendige Fahrstreifenwechsel, die durch die Routenführung, Verkehrsregelung oder Fahrstreifenreduktion bedingt sind und
- freiwillige Fahrstreifenwechsel, die z. B. dem Erreichen der Wunschgeschwindigkeit dienen.

Nach der Entscheidung, ob ein Fahrstreifenwechsel notwendig ist, erfolgt meist die Entscheidung, ob ein Fahrstreifenwechsel möglich ist.

2.4.3.1 Sparmann

Das Modell nach SPARMANN [1978] bezieht sich auf zweistreifige Autobahnabschnitte und adressiert in erster Linie taktische Fahrstreifenwechsel.

Ausgehend von der Einhaltung des Rechtsfahrgebots wechseln die Fahrzeuge auf die Überholspur, den linken Fahrstreifen, um ihre Wunschgeschwindigkeit realisieren zu können. Die grundsätzliche Entscheidung für den Fahrstreifenwechsel muss frühzeitig erfolgen, um die aktuell gefahrene Geschwindigkeit beibehalten zu können und nicht zu sehr durch das vorausfahrende, langsamere Fahrzeug beeinflusst zu werden. Der Fahrstreifenwechsel wird durchgeführt, wenn der Verkehr auf dem gewünschten Fahrstreifen dies zulässt, sonst wird die Geschwindigkeit auf dem rechten Fahrstreifen reduziert.

Der Wechsel vom linken auf den rechten Fahrstreifen wird durch das Rechtsfahrgebot bedingt. Sobald der Fahrer seine Wunschgeschwindigkeit auf dem linken Fahrstreifen für eine bestimmte Zeit erreicht oder schnellere Fahrzeuge von hinten das Fahrzeug beeinflussen, wird er wieder auf den rechten Fahrstreifen zurückwechseln.

Für die Verkehrssimulation VISSIM wurde das Fahrstreifenwechselmodell von Sparmann weiter angepasst. In der derzeit aktuellen Version, wird der Fahrstreifenwechsel durch notwendige Fahrstreifenwechsel, um die Route einzuhalten und freie Fahrstreifenwechsel, um die Wunschgeschwindigkeit einhalten zu können nach folgenden Regeln abgebildet [vgl. PTV AG, 2012]:

Für die Abbildung eines notwendigen Fahrstreifenwechsels werden die maximal akzeptable Verzögerung des Fahrzeugs und des Folgefahrzeugs auf dem neuen Fahrstreifen in Abhängigkeit zur Entfernung bis zum Ort des notwendigen Fahrstreifenwechsels berücksichtigt. Sobald eine genügend große Zeitlücke vorhanden ist, wechselt das Fahrzeug. Die erforderliche Größe der Zeitlücke ist abhängig von der Geschwindigkeit und der Aggressivität (letztere wird abgebildet über maximale Verzögerungen).

Beim freien Fahrstreifenwechsel wird der gewünschte Sicherheitsabstand zum Folgefahrzeug auf dem neuen Fahrstreifen berücksichtigt. Dieser Sicherheitsabstand ist abhängig von den Geschwindigkeiten des vorausfahrenden und des wechselnden Fahrzeugs.

2.4.3.2 Gipps

Das Wechseln des Fahrstreifens wird als Entscheidungsprozess modelliert. Es wird unterschieden zwischen notwendigen Fahrstreifenwechseln, um auf der geplanten Route weiterzufahren, und wünschenswerten Fahrstreifenwechseln, um die eigene Wunschgeschwindigkeit zu erreichen, wenn das Vorderfahrzeug zu langsam fährt. Je nach Dringlichkeit und Parametrisierung entscheidet sich der Fahrer für die entsprechenden Fahrstreifenwechsel. Dies wird im Modell erreicht, indem drei Zonen im Vorfeld eines notwendigen Fahrstreifenwechselpunktes definiert werden. In Zone 1 will der Fahrer mit seiner Wunschgeschwindigkeit fahren, er fährt nach links, wenn er dort schneller fahren kann und wechselt nach rechts, wenn er dort nicht wesentlich langsamer fahren muss. In Zone 2 versucht der Fahrer den Zielfahrstreifen oder zumindest den danebenliegenden zu erreichen. In Zone 3 ist die Einhaltung der Wunschgeschwindigkeit nicht mehr essentiell, der Fahrer verzögert ggf. und wechselt auf den Wunschfahrstreifen, sobald eine seinem Sicherheitsbedürfnis entsprechende Lücke vorhanden ist.

2.4.3.3 Krajzewicz

Das Fahrstreifenwechselmodell nach KRAJZEWICZ [2008] beinhaltet taktische und strategische Komponenten. Notwendige Fahrstreifenwechsel werden zum Einhalten der jeweiligen Route durchgeführt. Bei der Modellierung von taktischen Fahrstreifenwechseln ist auch das Erhöhen der Geschwindigkeit möglich.

2.4.3.4 Ehmanns

Das Fahrstreifenwechselmodell nach EHMANN [2003] beinhaltet neben dem notwendigen Überholen oder dem Ausweichen vor Hindernissen auch taktische Komponenten wie z. B. ein aktives Ansteuern von Lücken und die Aufweitung vorhandener, enger Lücken [vgl. auch BENMIMOUN, 2004]. Basis für das Fahrstreifenwechselmodell ist die Zufriedenheit des Fahrers je Fahrstreifen. Falls der Fahrer den Wunsch hat, den Fahrstreifen zu wechseln, wird geprüft, inwiefern dies je nach umgebendem Verkehr und Fahrereigenschaften umgesetzt werden kann.

2.4.4 Mikroskopische Verkehrssimulationswerkzeuge

Es gibt eine Vielzahl an mikroskopischen Verkehrssimulationen, im Folgenden werden die am häufigsten verwendeten kurz vorgestellt.

2.4.4.1 AIMSUN

Die Verkehrssimulation AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks) stammt von der spanischen Firma Transportation Simulation System (TSS). In der aktuellen Version, AIMSUN 6, können neben mikroskopischen auch makroskopische und mesoskopische Simulationen durchgeführt werden [TSS, 2011]. AIMSUN nutzt Modelle für die Fahrzeugfolge, Fahrstreifenwechsel und die Zeitlückenakzeptanz. Das Fahrzeugfolgemodell in AIMSUN basiert auf dem Gipps-Modell [GIPPS, 1981], siehe Abschnitt 2.4.2.1. Das Fahrstreifenwechselmodell in AIMSUN basiert auch auf Gipps' Arbeiten [GIPPS, 1986], siehe Abschnitt 2.4.3.2. Die Modellparameter sind nicht global, sondern abhängig von Fahrertyp, lokalen Gegebenheiten und dem Einfluss der umgebenden Fahrzeuge.

Über ein Application Programming Interface (API) kann während der Simulation auf viele der Simulationsdaten zugegriffen werden. So können verschiedene Modellobjekte (z. B. Lichtsignalanlagen oder Streckenbeeinflussungsanlagen) auch extern gesteuert werden. Die Modelle für die Fahrzeugbewegung können durch eigene Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselmodelle (in C++ programmiert) ausgetauscht werden.

2.4.4.2 PARAMICS

PARAMICS (Parallel Microscopic Simulation) stammt aus Großbritannien und wird von den Firmen Quadstone und SIAS vertrieben [www.paramics.com].

Für das Folgeverhalten wird das psycho-physische Modell nach FRITZSCHE [1994], siehe Abschnitt 2.4.2.4, verwendet. Das Fahrstreifenwechselverhalten stammt ebenfalls von FRITZSCHE [1994]. Paramics verfügt über Schnittstellen, um z. B. Verkehrsnetze direkt in Paramics importieren zu können. Paramics SDK erlaubt dem Nutzer die eigenständige Erweiterung der vorhandenen Funktionen des Werkzeuges.

2.4.4.3 Sumo

SUMO (Simulation of Urban Mobility) ist eine Open-Source-Software, die seit 2001 hauptsächlich durch das Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelt wird, aber prinzipiell jedem die Möglichkeit bietet, das Tool weiterzuentwickeln [www.sumo.sourceforge.net].

Für das Folgeverhalten wird das Modell nach KRAUß [1998] verwendet, siehe Abschnitt 2.4.2.2. Das Fahrstreifenwechselverhalten stammt von KRAJZEWICZ [2008], siehe Abschnitt 2.4.3.3.

2.4.4.4 Vissim

VISSIM (Verkehr in Städten Simulation) stammt von der PTV AG in Karlsruhe. Die Entwicklung von VISSIM begann 1992. Die Simulation des Folgeverhalten stützt sich auf das psycho-physische Modell von WIEDEMANN [1974], es wird allerdings inzwischen eine Weiterentwicklung von Wiedemann aus dem Jahr 1999 verwendet, die nicht veröffentlicht wurde; (siehe Abschnitt 2.4.2.3 und [PTV AG, 2012]). Das Verhalten beim Fahrstreifenwechsel basiert auf dem Modell von SPARMANN [1978] (siehe Abschnitt 2.4.3.1) und ist auch in einer weiterentwickelten Form integriert. Es werden auch notwendige Fahrstreifenwechsel zum Einhalten der geplanten Route abgebildet.

FELLENDORF & VORTISCH [2001] zeigen die prinzipielle Eignung von VISSIM verschiedene reale Verkehrsszenarien zu reproduzieren und weisen dies für deutsche und amerikanische Verkehrssituationen nach. Validierte VISSIM-seitige Standardparameter sind somit für deutsche und amerikanische Verkehrszustände vorhanden.

Die Verkehrssimulationsanwendung VISSIM ermöglicht die Anbindung externer Algorithmen mithilfe verschiedener Programmierschnittstellen. VISSIM ermöglicht über die sogenannte COM- Schnittstelle (component object model) externen Programmen das Eingreifen in die Simulation. Das Fahrerverhalten kann der Nutzer durch eigene externe Modelle austauschen. Speziell für die Modellierung von kooperativen Systemen und die Nutzung von vehicle-to-x-Kommunikation (V2X) wurde die V2X-API entwickelt. Auf eine Vielzahl von Fahrzeug- und Infrastrukturdaten kann während der Laufzeit lesend und schreibend zugegriffen werden. Zusätzlich können Versand und Empfang von Nachrichtenpaketen per WLAN über das VCOM-Modul modelliert werden [KILLAT ET AL., 2007]. Das Zusammenspiel zwischen Verkehrssimulation, Kommunikationsmodell und V2X-Anwendung ist in folgendem Bild 2-22 dargestellt:

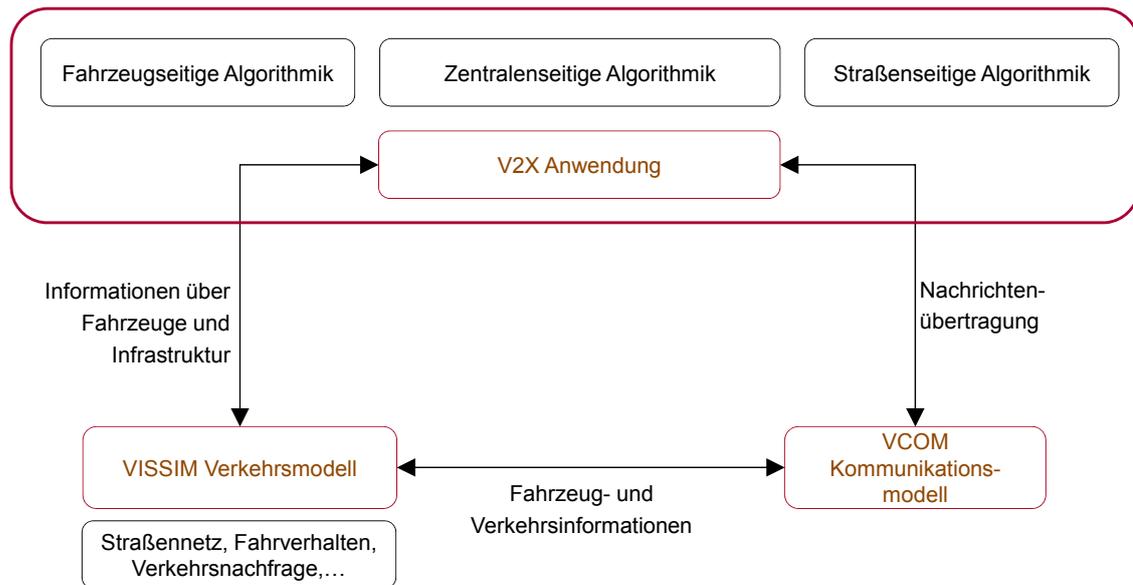


Bild 2-22: Interaktionen und Schnittstellen zwischen Verkehrssimulation, Kommunikationsmodell und C2X-Anwendung

2.4.4.5 Pelops

Das Verkehrsflusssimulationsprogramm PELOPS (Programmsystem zur Entwicklung Längsdynamischer mikroskopischer Verkehrsprozesse in systemrelevanter Umgebung) wurde am Institut für Kraftfahrwesen Aachen in Zusammenarbeit mit der BMW AG entwickelt und wird heute von der Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen (fka) vertrieben und gepflegt [www.pelops.de]. Verglichen mit anderen mikroskopischen Verkehrssimulationen unterscheidet sich PELOPS durch eine wesentlich detailliertere Nachbildung der Fahrzeugeigenschaften und -prozesse und stellt eine Kombination von fahrzeugtechnischen und verkehrstechnischen Modelle dar. PELOPS gliedert sich in drei Teile: Fahrermodell, Umweltmodell und Fahrzeugmodell und die entsprechenden Interaktionen zwischen diesen.

Das Fahrermodell ist in ein Verhaltens- und ein Handlungsmodell unterteilt. Im Verhaltensmodell wird die lokale Fahrstrategie aus dem aktuellen Fahrzustand und der Fahrzeugumgebung ermittelt. Die Parameter der lokalen fahrerbezogenen Fahrstrategie sind eine gewünschte Beschleunigung, der Fahrstreifen und ggf. der einzulegende Fahrgang. Im Handlungsmodell werden diese Parameter dann in fahrzeugseitige Stellgrößen wie Lenkbewegung, Pedalbetätigung, Gangwahl und Setzen des Blinkers umgesetzt [PELOPS, 2012].

Das Folgemodell zur Beschreibung des Längsverhaltens basiert im Kern auf dem Fahrzeugfolgemodell von WIEDEMANN [1974]. Das Fahrstreifenwechselverhalten wird basierend auf EHMANN [2003] modelliert.

Auch in PELOPS können eigene Modellen integriert werden. Es gibt eine Schnittstelle, die die Integration von Fahrzeugmodellen oder Regelalgorithmen von Assistenzsystemen durch MATLAB erlaubt. Um externe Soft- und Hardware integrieren zu können, gibt es eine serielle Schnittstelle und eine CAN-Bus Anbindung.

2.4.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Für die vorliegende Fragestellung ist die taktische Ebene bzw. das regelbasierte Verhalten entscheidend, da sich hier die Prozesse für das Verhalten in verkehrssicherheitskritischen Sondersituationen abspielen. Die detaillierte Betrachtung der Prozesse auf der operativ steuernden bzw. fertigkeitbasierten Verhaltensebene sind zu kleinteilig für die Beantwortung der Frage nach der Wirkung zukünftiger Assistenzsysteme. Es wird allerdings die Wirkungen dieser Prozesse betrachtet: also z. B. der neue Fahrstreifen nach dem Lenkmanöver bzw. die resultierende Beschleunigung oder Geschwindigkeit unabhängig vom Gangwechsel. Die detaillierte Modellierung der operativen (steuernden) Ebene erfordert sehr viel Detailwissen, viele Eingangsdaten und während der Simulation sehr viel Rechenkapazität. Für die zugrundeliegende Fragestellung sind solch detaillierte Ausgabedaten nicht relevant. Die Fragestellung zielt auf die Untersuchung des Einfluss von ITS und FAS auf ein großes Fahrzeugkollektiv.

Bei der Modellierung des Längsverhaltens ist es wichtig, auch das menschliche Fehlverhalten und unterschiedliche Fahrerreaktionen zu berücksichtigen, d. h. die Gruppe der psychophysischen Modelle (z. B. Wiedemann und Fritzsche) ist für die vorliegende Fragestellung die geeignete Wahl.

Bei der Modellierung des Querverhaltens im Sinne von Fahrstreifenwechseln ist es für die vorliegende Fragestellung wichtig, auch dringende Fahrstreifenwechsel aufgrund von gefährlichen Situationen, die ggf. erst spät erkannt werden, abbilden zu können.

In der vorliegenden Arbeit wird die mikroskopische Verkehrssimulation VISSIM (momentan in der Version 5.40-04, Stand vom 11.07.2012) verwendet. Dafür sprechen mehrere Gründe. Es sind beispielsweise bereits umfassende Validierungen für die grundlegenden Simulationsmodelle erfolgt und dokumentiert. Auch in der Basisversion sind das Längs- und Querverhalten, auch für den fehlerbehafteten Fahrer, schon gut abbildbar. Die für kommunikationsbasierte ITS und FAS Systeme notwendige Modellierung der Übertragungstechnologie ist bereits integriert und es liegen entsprechende Schnittstellen vor, die Eingriffsmöglichkeiten für die detailliertere Modellierung verkehrssicherheitskritischer Situationen ermöglichen. Die Einflussmöglichkeiten Fahrzeuge und Infrastrukturkomponenten zu steuern und Fahr- und Verkehrssituationen aus aktuellen Fahrzeuginformationen detailliert zu beobachten, ermöglichen die geeignete Anpassung des Fahrerverhaltens in verkehrssicherheitsrelevanten Situationen für die jeweiligen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten.

2.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In Kapitel 2 wurden Basisinformationen zusammengestellt, die für die Modellierung von Fahrerverhalten in verkehrssicherheitskritischen Situationen und für die darauf aufbauende Wirkungsanalyse benötigt werden.

Der Begriff *verkehrssicherheitskritische Sondersituation* wurde für die vorliegende Fragestellung definiert, basierend auf gängigen Definitionen des Situationsbegriffs und einer Zusammenstellung und Einordnung von Begrifflichkeiten zur Verkehrssicherheit.

Es wurde gezeigt, worin der Mehrwert von Verkehrssicherheitsanalysen mit Hilfe der Verkehrssimulation liegt, verglichen mit anderen Versuchsumgebungen. Der Nutzen einer modifizierten Verkehrssimulation für verkehrssicherheitskritische Sondersituationen liegt in der Ermittlung der Wirkungen neuer Systeme auf den gesamten Verkehr für z. B. vergleichende Analysen verschiedener Ausstattungsraten oder -alternativen.

Die Betrachtung des Unfallgeschehens und verschiedener Untersuchungsansätze zur Verkehrssicherheit zeigen, dass gerade die fahrerspezifisch unterschiedliche Wahrnehmung der Umwelt in der Fahrermodellierung berücksichtigt werden sollte. Häufig ist das Untersuchungsziel in der Verkehrssimulation der Wirkungsvergleich unterschiedlicher Ausstattungsraten, daher müssen in der Modellierung im Besonderen die Unterschiede zwischen Fahrern mit und ohne System nachgebildet werden.

In Anlehnung an die Ansätze von GETTMAN & HEAD [2003] und ARCHER [2000, 2005] können Aussagen zum Einfluss neuer Systeme auf die Verkehrssicherheit auch unabhängig von der Angabe veränderter Unfallanzahlen getätigt werden. Die Verwendung von alternativen, mikroskopischen Kenngrößen ist geeignet, relative Unterschiede zwischen verschiedenen Systemalternativen aufzeigen. Untersuchungen in der Simulation bezwecken meist die Ermittlung von relativen Unterschieden zwischen verschiedenen Systemalternativen. Es wird davon ausgegangen, dass über den Vergleich dieser Ersatzkenngrößen Rückschlüsse über die Wirkung auf die Verkehrssicherheit getroffen werden können.

Die häufigsten Unfallursachen zeigen, dass für die Modellierung von Verkehrssicherheit nähere Betrachtungen des regelkonformen und fehlerbehafteten Fahrerhaltens in den Bereichen Längsverhalten (Geschwindigkeitswahl und Abstand) und Querverhalten (Fahrstreifenwechselverhalten) notwendig sind. Die detaillierte Modellierung von menschlichem Fehlverhalten in ihren originären Ursachen ist für die vorliegende Fragestellung zu komplex und für die Untersuchungsziele nicht notwendig. Stattdessen wird es als sinnvoll erachtet, die Wirkungen dieses menschlichen Fehlverhaltens in der Verkehrssimulation abzubilden, also z. B. den verspäteten Reaktionsbeginn oder die nicht der Situation angepasste Geschwindigkeit.

Eine weitere Voraussetzung für die simulative Untersuchung ist, dass durch die verwendete Simulationsumgebung detaillierte Eingangsgrößen für das Fahr- bzw. Fahrerverhalten in

geeigneter Weise abgebildet werden können. Die Zusammenstellung von Kenngrößen hat gezeigt, dass die theoretisch notwendigen Eingangsgrößen für die Modellierung von Längs- und Querverhalten und entsprechende Ausgabegrößen aus der Verkehrssimulation sowie gängige Kritikalitätsschwellen für die Bewertung vorhanden sind. Auch die Verwendung von Expositionsdauer und -intensität kann zusätzliche Aussagen hinsichtlich der Wirkung auf die Verkehrssicherheit liefern.

Der Vergleich verschiedener Fahrermodelle für die Modellierung des Verhaltens in Längs- und Querrichtung hat gezeigt, dass die Gruppe der psycho-physischen Modelle für die zugrundeliegende Fragestellung geeignet ist. In der vorliegenden Arbeit wird die mikroskopische Verkehrssimulation VISSIM verwendet, da sie schon in der Basisversion diese Variabilität des Fahrerverhaltens abbilden kann. Darüber hinaus liegen bereits entsprechende Modelle und Schnittstellen vor, die Eingriffsmöglichkeiten für die detailliertere Modellierung verkehrssicherheitskritischer Situationen ermöglichen.

3 MODELLBILDUNG

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Ebenen zur Bildung eines Modells für das mikroskopische Fahrerverhalten in verkehrssicherheitskritischen Sondersituationen dargestellt. Zunächst wird allgemein der Modellierungsansatz mit der grundsätzlichen Modellidee, den dafür notwendigen Basisdaten und dem angedachten Vorgehen für die Modellierung erläutert. Für zwei Untersuchungssituationen mit verkehrstechnischen Anwendungen wird der Modellierungsansatz exemplarisch angewendet und auf Machbarkeit überprüft.

3.1 Modellierungsansatz

Ziel des zu entwickelnden Modells ist die realistische Abbildung des Fahrerverhaltens in verkehrssicherheitskritischen Situationen. Basierend auf detaillierten mikroskopischen Daten von realen Fahrern werden Erkenntnisse über das zu modellierende Fahrerverhalten in der jeweiligen Situation gewonnen.

3.1.1 Modellidee

Dieser Modellierungsansatz nutzt als Datenbasis reale räumlich und zeitlich detaillierte Fahrerdaten verschiedener Fahrer in einer vergleichbaren Untersuchungssituation. Anhand dieser Daten werden charakteristische Fahrerreaktionen mit und ohne Assistenzsystem ermittelt. Diese unterschiedlichen Fahrerreaktionen münden jeweils in stochastische Fahrerverhaltensverteilungen. Ziel ist es, dass Fahrerverhalten lediglich in dem Bereich der verkehrssicherheitskritischen Sondersituation zu verändern und an die realen Beobachtung anzupassen. Um unterschiedliche Fahrerreaktionen abzubilden, werden stochastische Verteilungen erzeugt. Für jede Fahrer-Fahrzeug-Einheit werden zufallsverteilt Fahrerreaktionen aus der Verteilung zugewiesen. Bei diesem „zufälligen Ziehen“ aus einer Verteilung muss gewährleistet werden, dass der jeweilige Fahrer bei den Übergängen zwischen den Situationen ähnliche Charakteristiken behält (vgl. Bild 3-1). Ein langsamer Fahrer soll in der kritischen Situation nicht plötzlich schneller werden.

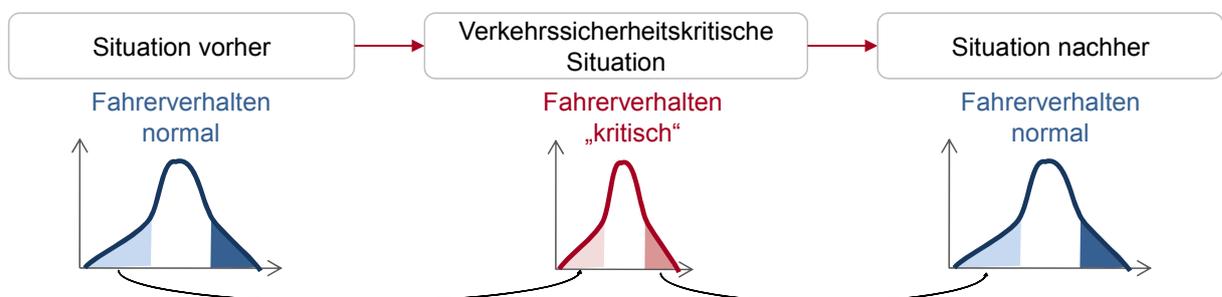


Bild 3-1: Modellierung des stochastischen Fahrerverhaltens vor, während und nach der verkehrssicherheitskritischen Situation

Zunächst werden grundlegende Annahmen für das Fahrerverhalten in der jeweiligen Situation getroffen. Die Untersuchung der Fahrerreaktionen in verkehrssicherheitskritischen Situationen unterteilt sich in folgende Teilaspekte:

- WAS macht der Fahrer?
 - Verändert der Fahrer die Geschwindigkeit?
 - Verändert er den Sicherheitsabstand?
 - Wechselt er den Fahrstreifen?

- WIE ist die Ausprägung seiner Reaktion?
 - Wie stark verändert er die Geschwindigkeit?
 - Wie stark verändert er den Sicherheitsabstand?

- WANN bzw. WO reagiert der Fahrer?
 - In welchem zeitlichen oder räumlichen Abstand zum Ereignis beginnt der Fahrer zu bremsen?
 - Wann oder wo wechselt der Fahrer den Fahrstreifen?

Ziel der Datenanalyse ist herauszufinden, wann und wie die Fahrer ihr ursprüngliches „unbeeinflusstes“ Fahrerverhalten verändern und dies geeignet in der Verkehrssimulation abzubilden. Dabei werden nicht die Ursachen für die variierenden Fahrerreaktionen modelliert, z. B. die frühere oder spätere Wahrnehmung des Ereignisses durch Ablenkung. Es werden die Wirkungen variierender Fahrerreaktionen modelliert, also z. B. die Variabilität des Ortes der Fahrerverhaltensanpassung. Das bedeutet z. B. die Modellierung von Fahrern, die spät reagieren, und von welchen, die früh reagieren - entsprechend der Verteilung der Basisdaten.

3.1.2 Basisdaten für die Modellierung

Eine Untersuchung verkehrssicherheitskritischer Situationen in der Verkehrssimulation liefert dann einen Mehrwert, wenn realistische Untersuchungen durchgeführt werden können, die auf den Basisdaten aufbauen und zusätzliche Erkenntnisse liefern. Verschiedene Versuchsumgebungen bieten verschiedene Vor- und Nachteile hinsichtlich der Eignung als Lieferant von Basisdaten für die Modellierung (siehe auch Abschnitt 2.2.1).

Die Datenbasis für die Modellierung des Fahrerverhaltens in der Verkehrssimulation muss folgende Randbedingungen erfüllen:

- Die Untersuchungssituation muss repräsentativ sein und die erhobenen Daten müssen die Untersuchungssituation repräsentieren.
- Die Randbedingungen für die Basissituation, in der die Daten erhoben wurden, müssen gut dokumentiert sein, so dass bei der Datenanalyse das erfasste Fahrerverhalten eindeutig der gewünschten Untersuchungssituation zugeordnet werden kann.

- Die Datensätze verschiedener Fahrer müssen in vergleichbaren Situationen erfasst sein, denn nur so können sie zusammengefasst und für die Modellierung verallgemeinert werden.
- Die fahrerbezogenen Datensätze müssen detaillierte Informationen über das Fahrerverhalten und dessen Änderungen in Relation zu Zeit und Ort enthalten.

Das Forschungsprojekt sim^{TD} [www.simTD.de] bietet die Datenbasis für die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit. Im Rahmen des Projekts werden zwischen 2008 und 2013 verschiedene sicherheits- und effizienzsteigernde Funktionen der Fahrzeug-Fahrzeug- und Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation entwickelt, implementiert und hinsichtlich ihrer Wirkungen untersucht. Im Projekt sim^{TD} kommen verschiedene Versuchsumgebungen zum Einsatz und durch das Zusammenspiel dieser verschiedenen Versuchsumgebungen wird eine umfassende Untersuchung zur Funktionsweise und Wirkung kommunizierender Assistenzsysteme ermöglicht:

- Angeleitete Versuche im realen Verkehr mit einer Flotte von bis zu 120 Fahrzeugen und 80 straßenseitigen Kommunikationspunkten (ITS Roadside Stations).
- Versuche im abgeschlossenen Testgelände, die Untersuchungen ohne den Einfluss von Fremdfahrzeugen ermöglichen.
- Versuche in der Fahrsimulation im Besonderen für die Untersuchung sicherheitskritischer Situationen.
- Versuche in der Verkehrssimulation zur Ermittlung des Einflusses unterschiedlicher Systemkonfigurationen (Ausstattungsrate, Kommunikationsmedium) auf den gesamten Verkehr.

Am Beispiel der Funktion „Warnung von dem Stauende“ werden das Versuchskonzept in sim^{TD} und das Zusammenspiel der Versuchsumgebungen näher erläutert [vgl. sim^{TD} D41.1, 2010]:

Beim angeleiteten Versuch im realen Verkehr fahren Fahrzeuge in zwei Gruppen auf ein Stauende zu. Ein Teil der Fahrer erhält eine Warnung, der andere Teil der Fahrer erhält keine Warnung. Die Wirkung der Warnung vor dem Stauende wird unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen im realen Verkehr untersucht z. B. für unterschiedliche Fahrzeug-Ausstattungsrate. Funktioniert die Technik und der Nutzer akzeptiert die Warnung, so können entsprechende Fahrerreaktionen ermittelt werden, z. B. wie sich die Funktion auf die Fahrsicherheit in Form von Abstandsverhalten, Geschwindigkeitsprofil,... auswirkt. Die Frage nach dem Einfluss der ausgestatteten Fahrzeuge auf die Verkehrssicherheit, d. h. auf das gesamte Fahrzeugkollektiv, ist gerade bei der Stauendewarnung mit der Untersuchung im realen Verkehr sehr schwierig zu beantworten. Dafür notwendige Daten über das detaillierte Fahrerverhalten aller Fahrzeuge direkt am Stauende sind nicht verfügbar und die infrastruktureitigen Daten liegen nur punktuell vor. Die Ergebnisse der Versuche im realen Verkehr unterliegen noch Randbedingungen, wie z. B. Wetter, die bei der Auswertung beachtet werden. Versuchsergebnisse (z. B. Abstandsverhalten) für die Warnung vor dem Stauende bei

trockenem Wetter mit guter Sicht können nicht mit Ergebnissen der Stauendewarnung bei starkem Regen kombiniert werden.

Da der Einfluss verschiedener Systemkonfigurationen (Ausstattungen, Kommunikation, Verkehrszustände) in einer identischen Situation verglichen werden soll, wird zusätzlich ein Simulationslabor aufgebaut.

In der Fahrsimulation durchfahren verschiedene Fahrer eine identische Situation. Es können z. B. gezielt Stauenden mit bestimmten Merkmalen erzeugt werden. Das Verhalten der Fahrer mit FAS kann mit dem Verhalten der Fahrer ohne FAS in der identischen Situation verglichen werden. In dieser Versuchsumgebung ist der Fahrer die veränderte Stellgröße, sonst bleiben die Randbedingungen pro Versuchsszenario gleich.

Die Fahrsimulationen wurden durch die Universität Würzburg in Zusammenarbeit mit dem Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften (WIVW GmbH) durchgeführt. Die sim^{TD} Funktionen werden im Fahrsimulator mit Bewegungssystem, im Fahrstand oder in der Pulksimulation durchgeführt. Zusätzliche Informationen auch zur Repräsentativität der einzelnen Fahrsimulatoren und zu den Testfahrern finden sich in: SIMTD W41.3 [2013].



Bild 3-2: Fahrsimulatoren in sim^{TD} (von links nach rechts: Fahrsimulator mit Bewegungssystem, Fahrstand und Pulksimulation) [Quelle: WIVW GmbH]

Die mikroskopischen Daten der einzelnen Fahrer in den jeweiligen Untersuchungssituationen zu den sim^{TD}-Funktionen wurden zur Verfügung gestellt und bilden die Datenbasis für die Anpassung und Modellierung des unterschiedlichen Fahrerverhaltens mit und ohne FAS in der Verkehrssimulation. Die Daten liegen jeweils von 20 Fahrern für jeweils eine Fahrt mit und ohne FAS vor. Die Daten umfassen folgende Informationen [SIMTD W41.3, 2013]:

- Daten zur Orientierung in der Strecke: z. B. Messzeitpunkt, Fahrer Kürzel, Fahrnummer, Bedingung (mit oder ohne HMI), genaue Position eingefügter Hindernisse bzw. Ereignisse (z. B. Notbremsungen anderer Fahrzeuge), Streckenmeter, Fahrstreifenindex, Kurvigkeit und Höhenprofil der Strecke, HMI-Warnstufe (nicht aktiv, Information oder Warnung),
- Daten über Bedienelemente: wie z. B. Blinkerstatus oder Bedienung des Touchscreens,
- Daten über Fahrdynamik und Abstände zu anderen Fahrzeugen und Objekten: wie zur Fahrstreifenhaltung (Time-to-Line-Crossing, Position auf Fahrstreifen, Zähler für Abkommen vom Fahrstreifen, Lenkwinkel, Gierwinkel, Querbeschleunigung), zur Längsführung (Geschwindigkeit, Gaspedal, Bremse, Längsbeschleunigung) und zum Abstand

(wie Abstand, Time-To-Collision und Sekundenabstand zum Führungsfahrzeug, Quer- und Längsabstand zu den umgebenden Fahrzeugen und Objekten, Zähler für Kollision) und

- Daten zu den Fahrzeugen, die sich direkt um das EGO-Fzg bewegen: wie Geschwindigkeit, Beschleunigung, Fahrzeug-ID oder Zeitlücken zwischen zwei Fahrzeugen.

3.1.3 Vorgehen

Eine aussagekräftige simulative Wirkungsanalyse von ITS und FAS benötigt ein stimmiges Simulationskonzept (siehe Bild 3-3). Die Auswahl und Variationen von repräsentativen Rahmenbedingungen beeinflussen die Qualität der Aussagen.

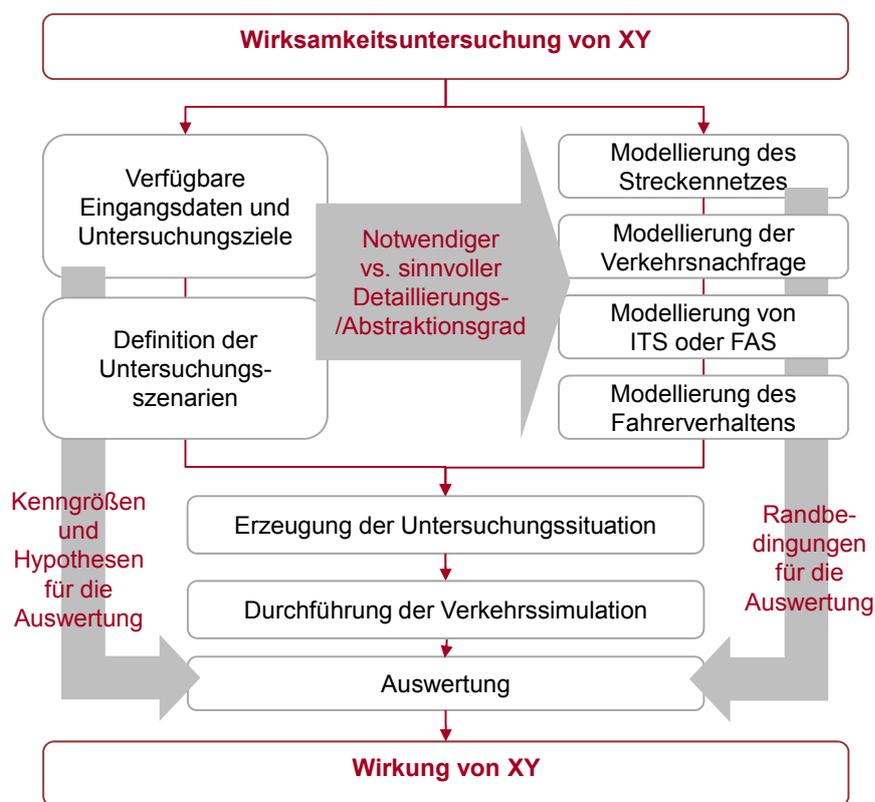


Bild 3-3: Untersuchungskonzept für die simulative Wirkungsanalyse von ITS und FAS

Vor Beginn der Simulation muss überlegt werden, welche Untersuchungsziele verfolgt werden sollen und welche Eingangsdaten dafür vorhanden sind. Dies mündet in die Definition der Untersuchungsszenarien, bei der entschieden werden muss, welche Variationen miteinander verglichen werden sollen, wie z. B. der Einfluss unterschiedlicher Ausstattungsdaten. Die Untersuchungsszenarien sollten vor der Modellierung der einzelnen Komponenten definiert sein, damit bei jeder der Komponenten die richtige Auswahl getroffen werden kann und der Detaillierungsgrad der Nachbildung festgelegt werden kann. Auswahlmöglichkeiten für die verschiedenen Komponenten sind z. B.:

- Welcher Teil des Streckennetzes ist repräsentativ für die Fragestellung?
Autobahn, innerorts, reales Netz oder idealisierter virtueller Streckenabschnitt?
- Welche Verkehrszustände sollen modelliert werden?
Frei, Stau, verschiedene Variationen?
- Wie detailliert muss das System nachgebildet werden?
Welche Abstraktionen bzw. Anpassungen der Systemsoftware bei der Nachbildung in der Simulation lassen die Ergebnisse noch aussagekräftig bleiben?
- Wie detailliert muss das Fahrerverhalten nachgebildet werden?
Welche Abstraktionen bzw. Anpassungen des modellierten Fahrerverhaltens bei der Nachbildung in der Simulation lassen die Ergebnisse noch aussagekräftig bleiben?

Bei der Planung der Auswertung müssen die Randbedingungen der Modellierung berücksichtigt werden. Auch sollte vorab schon überlegt werden, welche Kenngrößen und Kenngrößendarstellungen die Ergebnisse am besten repräsentieren könnten und welche Wirkungen erwartet werden, z. B. indem Wirkhypothesen aufgestellt werden.

Auf die Modellierung des Fahrerverhaltens für die Wirkungsanalyse wird im Folgenden detaillierter eingegangen. Für die Modellierung des Fahrerverhaltens ist es z. B. wichtig, aus den Daten die isolierte Reaktion des Fahrers auf die sicherheitskritische Situation oder das FAS möglichst direkt zu ermitteln. Das bedeutet, dass das Fahrerverhalten nur durch die Situation und nicht durch den umgebenden Verkehr beeinflusst werden sollte. Daher sind Untersuchungen unter der Randbedingung „freier Verkehr“ besonders geeignet. Der Fahrer kann z. B. im freien Verkehr sofort den Fahrstreifen wechseln, wenn dies die Situation verlangt, er muss nicht erst auf eine Lücke auf dem Nebenfahstreifen warten.

Der nächste Schritt für die Modellierung ist die Formulierung von Annahmen über das Fahrerverhalten und daraufhin die Analyse der Datenbasis. So können gezielt signifikante Parameter identifiziert werden, die als Eingangsgröße für die Modellierung dienen können (siehe Bild 3-4).

Wird eine Eingangsgröße bzw. eine Kombination verschiedener Eingangsgrößen als charakteristisch für das Fahrerverhalten und als geeignet für die Modellierung der jeweiligen Untersuchungssituation definiert, wird im zweiten Schritt die Art der stochastischen Verteilung dieser Kenngrößen über die verschiedenen Fahrer je nach Untersuchungsgruppe, z. B. mit oder ohne FAS, ermittelt. Diese werden als Stellgrößen in der Verkehrssimulation verwendet und modelliert. Für jede Fahrer-Fahrzeug-Einheit wird während der Simulation ein Zufallswert gemäß der zuvor ermittelten Verteilung zugewiesen.

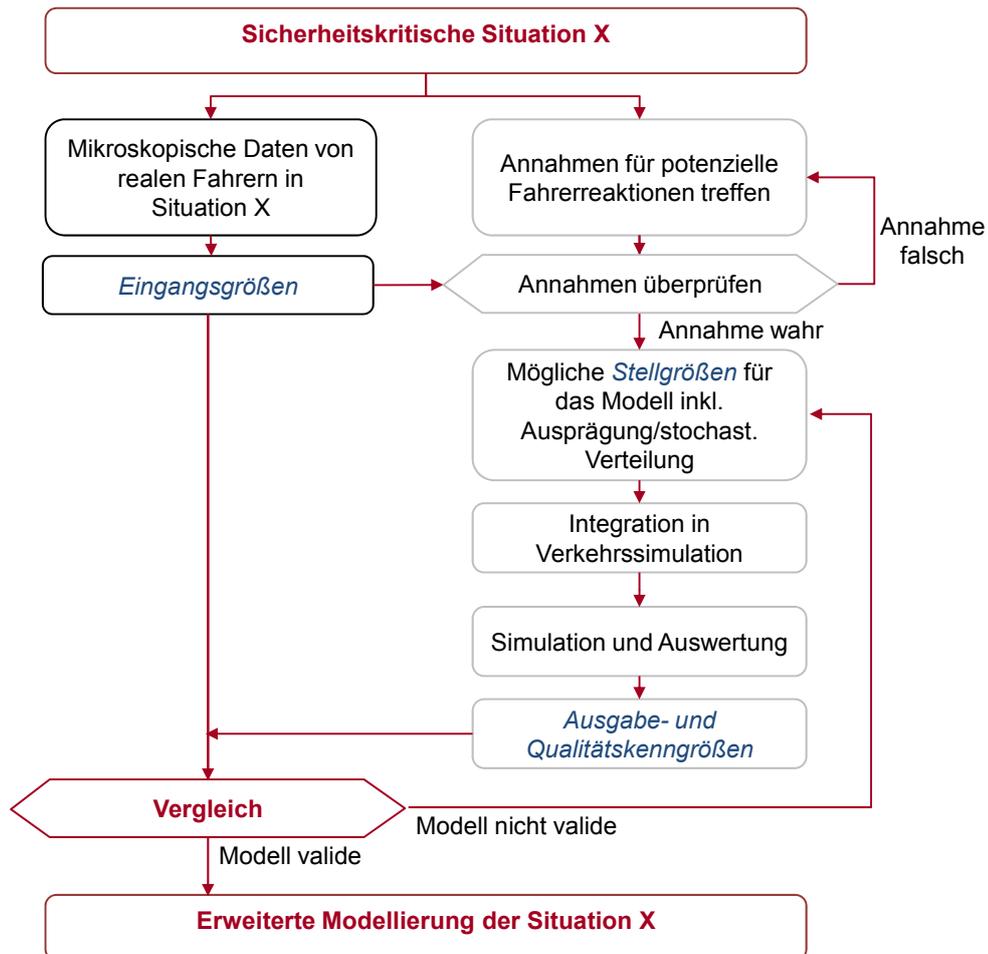


Bild 3-4: Vorgehensmodell für die Modellierung des Fahrerverhaltens

Die als Ausgabegrößen oder Qualitätskenngrößen aufbereiteten Ergebnisse der Verkehrssimulationsdurchläufe werden mit den Eingangsgrößen verglichen. Sofern die Daten eine gute Übereinstimmung zeigen, kann von einer validen und verbesserten Modellierung des Fahrerverhaltens in der betreffenden Situation ausgegangen werden.

Bei dem zuvor beschriebenen Ansatz hängt die Qualität der Modellierung von der Repräsentativität der verwendeten Eingangsgrößen ab. Je repräsentativer die verwendete Datenquelle ist, desto allgemeingültiger können die erzielbaren Aussagen sein. In den folgenden Untersuchungen liegt der Schwerpunkt auf der Überprüfung, ob das geplante Vorgehen prinzipiell machbar ist. Es wird das prinzipielle Vorgehen an einer begrenzten und verfügbaren Stichprobe geeigneter Eingangsdaten getestet, im Anschluss werden Rückschlüsse gezogen, inwiefern das Vorgehen geeignet sein kann, um mit einer größeren Datenbasis versorgt zu werden bzw. welchen Mehrwert eine vergrößerte Datenbasis liefern könnte.

3.2 Untersuchungssituationen und Anwendungsbeispiele

Der folgende Abschnitt enthält alle Hintergrundinformationen für die Modellierung der Untersuchungsbeispiele. Dies beinhaltet neben den exemplarischen Untersuchungssituationen die Beschreibung der untersuchten verkehrstechnischen Anwendungen. Es werden die Untersuchungskonzepte für die beiden Beispiele und die Randbedingungen für die Modellierung der Untersuchungssituationen vorgestellt.

3.2.1 Allgemeines

Für die Modellierung des Fahrerverhaltens werden Verhaltensänderung in Längsrichtung und Verhaltensänderungen in Querrichtung unterschieden:

Für die Fahrerverhaltensänderung in Längsrichtung sind zu untersuchende Fragestellungen: In welchem zeitlichen Abstand bzw. welcher örtlichen Distanz zum Ereignis beginnt der Fahrer mit einer Verhaltensänderung? Wie ist die Ausprägung z. B. beim Bremsen oder Abstand vergrößern? Wie sind Dauer und Stärke der Reaktion? Es gibt verkehrssicherheitskritische Situationen in denen eine Fahrerverhaltensänderung ausschließlich in Längsrichtung erforderlich oder möglich ist. Solche Situationen sind beispielsweise ein Hindernis auf dem benachbarten Fahrstreifen, die Annäherung an ein plötzliches Stauende, plötzlicher Nebel oder die plötzliche, starke Bremsung eines vorausfahrenden Fahrzeugs.

Für die Fahrerverhaltensänderung in Querrichtung sind zu untersuchende Fragestellungen: In welchem zeitlichen Abstand bzw. welcher örtlichen Distanz zum Ereignis wechselt der Fahrer den Fahrstreifen? Solche Situationen sind beispielsweise die Annäherung an einen Unfall, ein Hindernis oder eine Baustelle. Häufig ist die Fahrerverhaltensänderung in Querrichtung mit einer Fahrerverhaltensänderung in Längsrichtung gekoppelt, da für den Wechsel des Fahrstreifens ebenso die Geschwindigkeit der Situation angepasst wird.

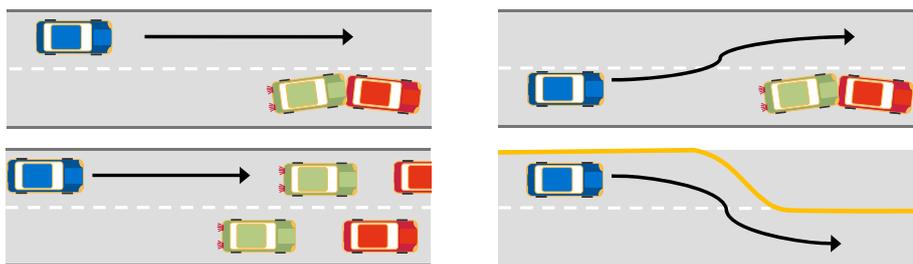


Bild 3-5: Darstellung verschiedener Möglichkeiten der Fahrverhaltensänderung in Längsrichtung (links) und Querrichtung (rechts)

Beide Arten der Fahrerverhaltensänderung werden in einer beispielhaften Untersuchungssituation angewendet, analysiert und im nachfolgenden Abschnitt bewertet. Die kommunikationsbasierten Fahrerassistenzsysteme, die beispielhaft untersucht werden, sind zwei der vielen Anwendungsbeispiele aus dem Projekt sim^{TD} und sollen dazu dienen, das beschriebene Vorgehen zur Modellierung und Wirkungsermittlung zu verdeutlichen. Als Beispiel für die

Modellierung der Fahrerverhaltensänderung in Längs- und Querrichtung wird die Warnung vor der Baustelle dargestellt. Zusätzlich werden Modellierungsschritte und Ergebnisse der Funktion Warnung vor dem Stauende für die Längsrichtung beschrieben. Es ist es nicht Ziel dieser Arbeit, die gewählten Anwendungsbeispiele zu bewerten oder zu hinterfragen.

3.2.2 Anwendungsbeispiele

Die FAS-Anwendungsbeispiele Baustellenwarnung und Warnung vor Stauenden sind Funktionen aus dem Projekt sim^{TD} . Die dargestellten Algorithmen entsprechen den Funktionsspezifikationen in sim^{TD} gemäß SIM^{TD} D11.3 [2009].

Bei der Baustellenwarnung sendet eine infrastrukturseitige Kommunikationseinrichtung zu Beginn der Baustelle Informationen über das Vorhandensein einer Baustelle und deren Position, aber nicht, ob und welche Fahrstreifen gesperrt sind.

Bei der Warnung vor Stauenden werden Stauenden erkannt: durch niedrige Geschwindigkeiten eines Fahrzeugs über einen entsprechend langen zeitlichen und räumlichen Bereich, das Einschalten des Warnblinkers oder die kooperative Analyse der Positionen und Geschwindigkeiten mehrerer Fahrzeuge mit System. Diese Information wird über fahrzeugseitige Kommunikation wiederum an weitere sich nähernde Fahrzeuge übertragen. Die fahrzeugseitige Stauerkennung beginnt, sobald das Fahrzeug auf der Autobahn langsamer als 30 km/h fährt. Dann wird ein Verlustweg berechnet. In jedem Zeitschritt wird addiert, wie viel Weg das Fahrzeug durch das langsame Fahren schon verloren hat. Der Vergleichswert ist der Weg, den das Fahrzeug bei 50 km/h zurückgelegt hätte. Sobald der Verlustweg größer als 100 m ist, wird eine Nachricht versendet. Die Stauausfahrt wird erkannt, wenn ein Gewinnweg von 400 m erreicht wird. Addiert wird der Weg, sobald das Fahrzeug über 40 km/h fährt. Der Vergleichswert ist der Weg, der bei 30 km/h zurückgelegt werden würde. Die kooperative Stauerkennung detektiert einen Stau, wenn mehr als zehn Fahrzeuge im Umfeld (bis zu 600 m voraus) erkannt werden und mindestens 30 % von diesen unter 28 km/h fahren oder mindestens 60 % bremsen. Wenn fünf bis zehn Fahrzeuge im Umfeld erkannt werden, wird ein Stau detektiert, wenn mindestens 50 % davon unter 28 km/h fahren oder mindestens 70 % bremsen.

Der Ort S für die rechtzeitige Information bzw. Warnung des Fahrers vor der Baustelle oder dem Stauende ist abhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit v :

$$S = v \cdot T + \frac{v^2}{2 \cdot a}$$

Die Funktion Baustellenwarnung informiert den Fahrer mindestens 200 m vor der Baustelle (= S_{min} - bei geringen Geschwindigkeiten) und maximal 1000 m (= S_{max} - bei hohen Geschwindigkeiten) vor der Baustelle. Für die Informationsstufe wird der Zeitfaktor T auf 5 s gesetzt und der Beschleunigungsfaktor a auf 1 m/s². Die Funktion warnt den Fahrer mindestens 100 m (= S_{min}) vor der Baustelle und bei extrem hohen Geschwindigkeiten ca. 1000 m

(= S_{max}) vor der Baustelle. Für die Warnstufe wird der Zeitfaktor T auf 5 s gesetzt und der Beschleunigungsfaktor a auf 2 m/s^2 erhöht. Bei der Warnung vor Stauenden wird für den Ort der Warnung S der Zeitfaktor T auf 2 s gesetzt und der Beschleunigungsfaktor a auf 2 m/s^2 . Die Funktion warnt den Fahrer mindestens 300 m und maximal 1000 m vor dem Stauende.

3.2.3 Untersuchungskonzepte und Modellierung der Untersuchungssituationen

Die exemplarisch durchgeführten Untersuchungen wird gemäß des in Bild 3-3 vorgestellten Ablaufs konzipiert.

Als Eingangsdaten für die Modellierung der Baustellenwarnung liegen mikroskopische Daten aus der Fahrsimulation vor. Es wurde jeweils ein zweistreifiger Autobahnabschnitt mit einer Baustelle bzw. mit einem Stauende simuliert. In Abschnitt 3.1.2 wird detailliert auf die Eingangsdaten und deren Nutzung für die Modellierung eingegangen.

Das Untersuchungsziel ist, in der Verkehrssimulation herauszufinden, wie sich unterschiedliche Ausstattungsraten mit diesem System auf die Verkehrssicherheit des Fahrzeugkollektivs im Vorfeld der Baustelle bzw. im Vorfeld des Stauendes auswirken.

Es ergeben sich folgende Untersuchungsszenarien in der Verkehrssimulation:

- Simulation eines zweistreifigen Autobahnabschnitts mit einer Baustelle, die den rechten Fahrstreifen blockiert, sowie
- Simulation eines zweistreifigen Autobahnabschnitts mit einem Stauende
- und jeweils die Variationen der Ausstattungsraten mit FAS unter sonst gleichen Bedingungen, d. h. das Streckennetz, die Verkehrsnachfrage, die Funktionsweise des FAS (z. B. Kommunikationsverhalten und Algorithmus) usw. bleiben gleich.

Welcher Teil des Streckennetzes ist repräsentativ für die Fragestellung? Die Wahl des Streckennetzes basiert auf den Gegebenheiten der Eingangsdaten. Es wird ebenfalls jeweils ein zweistreifiger Autobahnabschnitt gewählt. Zusätzlich spricht für die Wahl eines zweistreifigen Abschnitts, dass diese den größten Anteil des deutschen Autobahnnetzes repräsentieren. Die Untersuchung wird in der Verkehrssimulation an einem Teil der BAB A661 durchgeführt, dies ist ein Teil des realen Versuchsgebiets des Projekts sim^{TD} , das in der Verkehrssimulation nachgebildet wurde. Dieser Abschnitt hat eine Länge von 8700 Metern.

Welche Verkehrszustände sollen modelliert werden? Der Einfluss des Verkehrszustands wird gemäß den genannten Untersuchungszielen zwischen den Szenarien nicht variiert, es wird eine durchschnittliche, mittlere Verkehrsnachfrage für die Abbildung der Baustellenwarnung verwendet. Dieser Abschnitt wird in der Verkehrssimulation mit einer realen Verkehrsnachfrage und realem Anteil an Lastkraftwagen (Lkw) nachgebildet, kalibriert und validiert [vgl. BAUR & HOFFMANN, 2013]. Für die Untersuchung der Warnung vor Stauenden wird in der Verkehrssimulation ein Stauende erzeugt, das die Auslösung der zu untersuchenden Funktion ermöglicht.

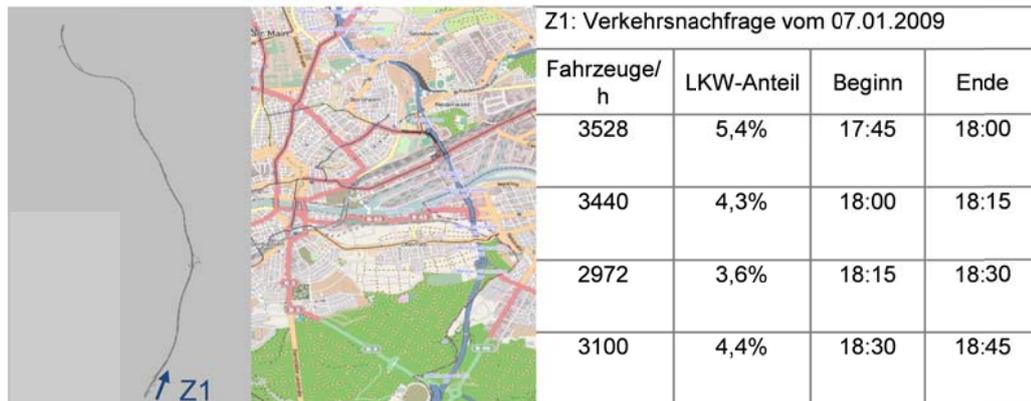


Bild 3-6: A661: Untersuchungsstrecke in der Verkehrssimulation (links) und in der Realität (mitte) [Quelle: OPENSTREETMAP] sowie die verwendete Verkehrsnachfrage (rechts) am Zufluss Z1

Wie detailliert muss das System nachgebildet werden? Die FAS-Nachbildung in der Verkehrssimulation erfolgt für die Baustellenwarnung und die Warnung vor Stauenden jeweils gemäß der Funktionsspezifikation der Originalfunktion, siehe Abschnitt 3.2.2 Anwendungsbeispiele. Dabei wird der Funktionsalgorithmus an die Gegebenheiten der Verkehrssimulation angepasst. Die Kommunikationsprozesse werden innerhalb der Verkehrssimulation durch das VCOM-Modul modelliert [vgl. KILLAT ET AL., 2007].

Die Untersuchung soll den Einfluss der Ausstattungsraten auf die Wirkung ermitteln, daher werden die Ausstattungsraten von Personenkraftwagen (Pkw) mit kommunikationsbasierten FAS variiert. Es werden vier Szenarien betrachtet und deren Wirkungen verglichen:

- 0 % Ausstattungsrate, als Vergleichsszenario (Nullfall),
- 20 % Ausstattungsrate, als relativ niedrige Ausstattung,
- 50 % für eine mittlere Ausstattungsrate und
- 80 % als Repräsentant für eine hohe Ausstattungsrate.

Wie detailliert muss das Fahrerverhalten nachgebildet werden? Die Modellierung des Fahrerverhaltens während der verkehrssicherheitskritischen Situation erfolgt getrennt für die beiden Anwendungsfälle und jeweils getrennt für die zwei unterschiedlichen Fälle: Fahrerverhalten ohne Nutzung eines FAS und Fahrerverhalten mit Nutzung des FAS. Das genaue Vorgehen zur Modellierung des Fahrerverhaltens wird in den nachfolgenden Abschnitten dargestellt.

Zur Erzeugung der Untersuchungssituation Baustellenwarnung wird im Netz am Streckenmeter 7200 ein Fahrstreifen über mehrere Meter reduziert (von zwei Fahrstreifen auf einen) und im Vorfeld wird ein infrastrukturseitiger Kommunikationspunkt (ITS Roadside Station) platziert, der die Information über die Baustelle versendet. Nähern sich Fahrzeuge dem Baustellenbereich, die mit dem FAS ausgestattet sind, wird der Nachrichtenempfang überprüft und ob die Nachricht schon für den Fahrer relevant ist. Würde in der Realität die Informations- bzw. Warnstufe der Funktion erreicht und der Fahrer erhielte eine Anzeige auf dem

HMI, so erhält die simulierte Fahrer-Fahrzeug-Einheit ein geändertes Fahrerverhalten gemäß der Modellierung. Je höher die Ausstattungsrate ist, desto mehr Fahrzeuge erhalten dieses geänderte Fahrerverhalten.

Zur Erzeugung der Untersuchungssituation Warnung vor Stauende wird im Netz eine Störung eingebaut, durch die sich bis zum Beginn der Datenaufzeichnung in der Simulation ein Stau aufbaut. Das Stauende bewegt sich innerhalb eines Bereiches von ca. 1,5 km. Nähern sich Fahrzeuge dem Stauende, die mit dem FAS ausgestattet sind, wird geprüft, ob das Stauende erkannt wird. Falls ja, wird eine Nachricht an den folgenden Verkehr gesendet. In allen Fahrzeugen mit FAS wird der Nachrichtempfang überprüft und ob die Nachricht schon für den Fahrer relevant ist. Würde in der Realität die Informations- bzw. Warnstufe der Funktion erreicht und der Fahrer erhielte eine Anzeige auf dem HMI, so erhält die simulierte Fahrer-Fahrzeug-Einheit ein geändertes Fahrerverhalten gemäß der Modellierung. Je höher die Ausstattungsrate ist, desto mehr Fahrzeuge erhalten dieses geänderte Fahrerverhalten.

In Bild 3-7 wird das allgemeine Vorgehensmodell aus Bild 3-3 angewendet und die oben genannten Festlegungen für die beispielhafte Wirkungsanalyse der Funktion Warnung vor der Baustelle werden zusammengefasst.

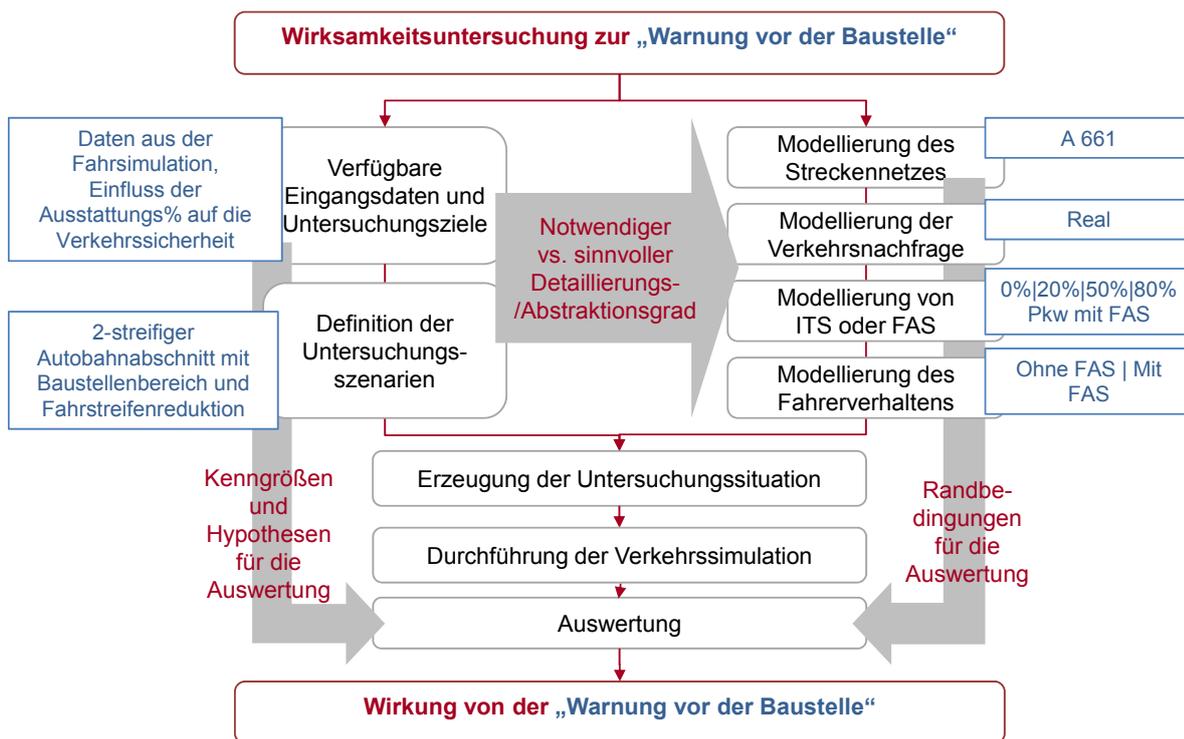


Bild 3-7: Vorgehen und Festlegungen für die Durchführung der simulativen Wirkungsanalyse der Funktion „Warnung vor der Baustelle“

Die Verkehrssimulationen werden für die verschiedenen Szenarien in Vissim (Version 5.40) in entsprechend genügend großer Anzahl durchgeführt. Die Auswertung der Ergebnisse wird in Kapitel 4 MODELLANWENDUNG UND BEWERTUNG dargestellt.

3.3 Modellierung des Fahrerhaltens

Ziel dieses Abschnitts ist es, die Durchführbarkeit des vorgeschlagenen Modellierungsansatzes zu veranschaulichen. Dafür werden für beide Untersuchungsbeispiele zunächst Annahmen für potenzielle Fahrerreaktionen getroffen. Die Eingangsdaten realer Fahrer aus vergleichbaren Untersuchungssituationen werden für beide Beispiele aufbereitet und analysiert. Schließlich münden die identifizierten Fahrerreaktionen in die Modellierung des Fahrerhaltens in Längs- und Querrichtung.

3.3.1 Annahmen für potenzielle Fahrerreaktionen

Bevor die Eingangsdaten genau analysiert werden, werden Annahmen für potenzielle Fahrerreaktionen in der zu untersuchenden Situation getroffen. Neben Überlegungen, welche Reaktionen notwendig und möglich sind: „WAS macht der Fahrer?“, ist für die Modellierung auch wichtig, WANN die Reaktion erfolgt (in welchem zeitlichen Abstand und welcher räumlichen Distanz zum Ereignis) und WIE stark die Reaktion ausfällt.

Mögliche Fahrerreaktionen (WAS?) sind:

- verzögern,
- nicht beschleunigen, bremsbereit sein,
- den Fahrstreifen wechseln und
- kooperativer und aufmerksamer fahren und z. B. den Abstand vergrößern.

Die tatsächlichen Fahrerreaktionen, ihre Ausprägungen und ihr Beginn hängen stark von der Einzelsituation des Fahrers ab. Je nachdem, ob ein Fahrerassistenzsystem vorhanden ist, das ihn informiert oder warnt, wird er früher oder später reagieren. Je nach Warnstufe gibt es vermutlich auch unterschiedliche Reaktionen. Je nach Position des Fahrzeugs zum sicherheitskritischen Ereignis kann es auch sein, dass keine Reaktion des Fahrers notwendig ist: z. B. wenn sich der Fahrer nicht auf dem betreffenden Fahrstreifen befindet. Dann stellt sich die Frage, ob Fahrer, die sich auf dem benachbarten Fahrstreifen befinden, ihr Fahrerverhalten trotzdem ändern.

Es ergeben sich folgende Arten von betrachteten Fahrergruppen (WER?):

- Fahrer ohne ITS bzw. FAS,
- Fahrer mit ITS bzw. FAS:
 - ab der Anzeige einer Information und
 - ab der Anzeige einer Warnung.
- Fahrer, bei denen die Fahrsituation eine Reaktion auf das Ereignis erfordert und
- Fahrer, bei denen die Fahrsituation keine Reaktion auf das Ereignis erfordert.

Falls eine Reaktion notwendig ist, dann bedingen sich der Zeitpunkt oder Ort der Reaktion und die Stärke gegenseitig. Je später die Reaktion stattfindet, desto stärker muss sie ausfallen, um den Unfall zu vermeiden. Auch das Vorhandensein eines Assistenzsystems beeinflusst den Reaktionsbeginn und die Reaktionsstärke. Ist die Information früher vorhanden,

kann früher reagiert werden und wenn früher reagiert wird, muss nicht so stark reagiert werden. Ebenso kann es sein, dass die Warnung dem Fahrer die Kritikalität der Situation verdeutlicht und dass dadurch seine Reaktion stärker ausfällt.

Annahmen für Fahrerreaktionen auf eine Wanderbaustelle

Die Annäherung an eine Wanderbaustelle mit Fahrstreifenreduktion erfordert teilweise einen Fahrstreifenwechsel als Fahrerreaktion. Daher werden Annahmen für die Fahrerreaktionen in Längs- und in Querrichtung getroffen.

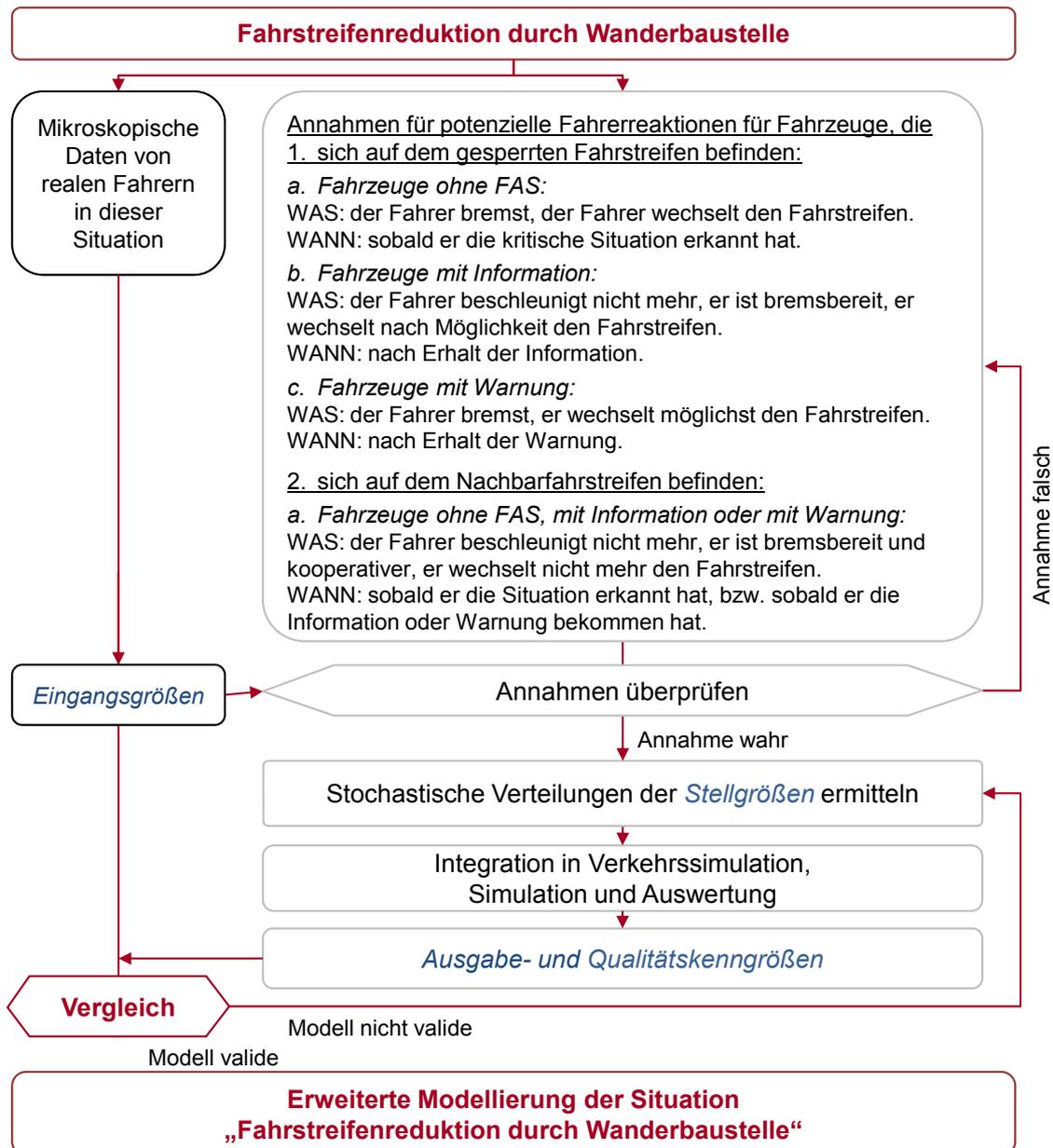


Bild 3-8: Annahmen und Vorgehensmodell für die Modellierung einer Fahrerreaktion auf eine Fahrstreifenreduktion durch eine Wanderbaustelle

Annahmen für Fahrerreaktionen auf ein Stauende

Die Annäherung an ein Stauende erfordert in der Regel keinen Fahrstreifenwechsel als Fahrerreaktion. Daher werden nur Annahmen für die Fahrerreaktionen in Längsrichtung getroffen.

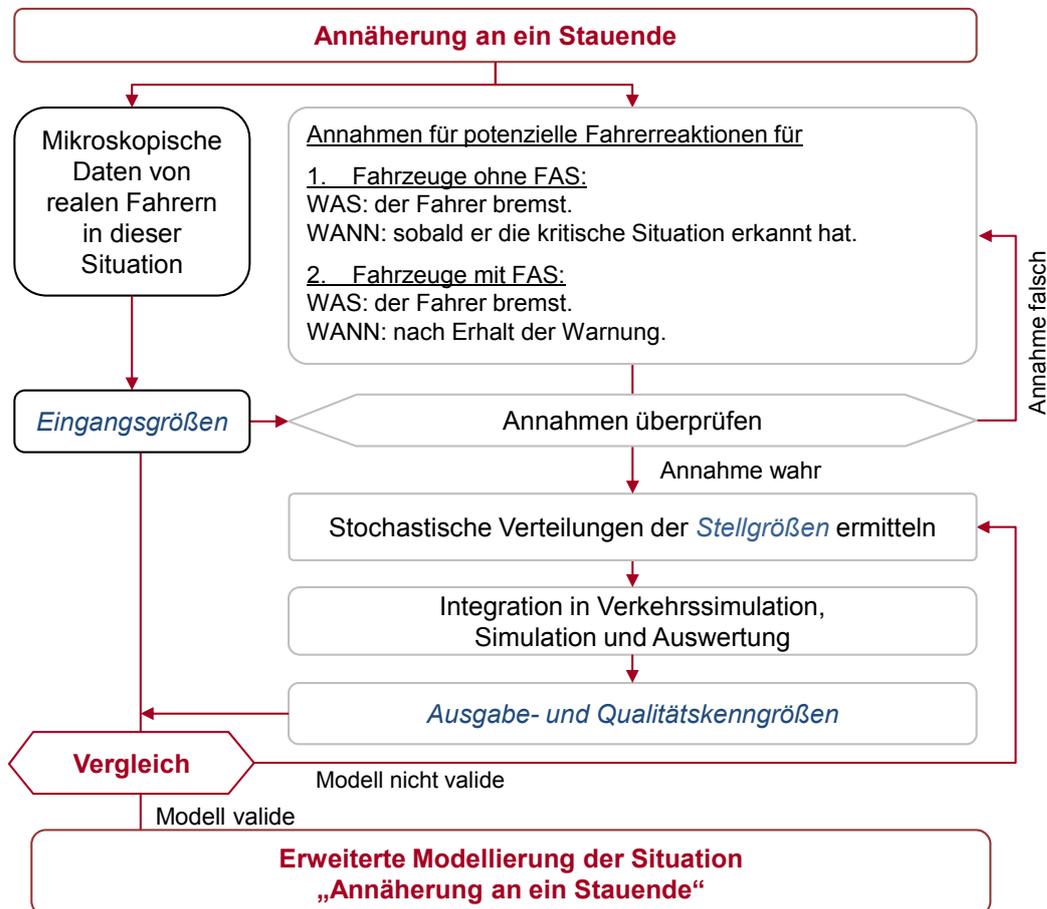


Bild 3-9: Annahmen und Vorgehensmodell für die Modellierung einer Fahrerreaktion auf eine Annäherung an ein Stauende

3.3.2 Aufbereitung und Analyse der Eingangsdaten

Die Modellierungen des Fahrerverhaltens in der Verkehrssimulation für die Reaktion auf eine Wanderbaustelle und auf ein Stauende basieren auf mikroskopischen Daten von realen Fahrern aus der Fahrsimulation [Detaillierte Informationen zu den Versuchen und den Eingangsdaten auch unter: SIM^{TD} W43.1, 2013].

Die Eingangsdaten aus der Fahrsimulation stammen jeweils aus Untersuchungen eines Autobahnabschnitts mit zwei Fahrstreifen mit einer Breite von je 3,50 m sowie einem Seitenstreifen mit einer Breite von 2,75 m. Die Untersuchungsstrecke hat eine Länge von 2600 m. Der Verkehrszustand für den umgebenden Verkehr wird für die Warnung vor der Baustelle mit „freier Verkehr“ charakterisiert. Die Geschwindigkeiten betragen im Mittel 162 km/h auf

dem linken Fahrstreifen und 100 km/h auf dem rechten Fahrstreifen. Die Versuchsfahrer in der Fahrsimulation treffen ca. bei Streckenmeter 1360 auf die Wanderbaustelle. Für die Untersuchung der Warnung vor dem Stauende liegt das Stauende am Ende einer Steigung (2,5 %) und ist rd. 1000 m vorher für den Fahrer erkennbar. Der Fahrer trifft ungefähr bei Streckenmeter 1700 auf das Stauende.



Bild 3-10: Untersuchungssituationen in der Fahrsimulation, links: Wanderbaustelle, rechts: Stauendewarnung [sim^{TD} W43.2, 2013]

20 Fahrer durchfuhren die Situation Baustellenwarnung zweimal, einmal mit FAS und einmal ohne FAS. Es gab keine Kollisionen. Zwei Fahrer wurden im Fall ohne FAS nicht in die Auswertung mit einbezogen, da die Untersuchungssituation nicht in einer verwertbaren Form hergestellt werden konnte. Ebenso 20 Fahrer durchfuhren die Situation Stauendewarnung zweimal, einmal mit FAS und einmal ohne FAS, jeweils ohne Kollisionen.

Die Daten aus der Fahrsimulation liegen in beiden Untersuchungsfällen pro Fahrer in Schritten von 100 Hz vor.

Für jeden Fahrer werden die oben getroffenen Annahmen untersucht. Die für die Modellierung charakteristischen Größen und deren Verläufe werden je nach Fahrsituation für beide Untersuchungsbeispiele analysiert. Die Untersuchung der Geschwindigkeit über Zeit und Ort gibt gute Indikatoren für die Änderungen des Fahrerverhaltens nach der Art der Beeinflussung des Fahrerverhaltens durch Information und Warnung oder auch nach dem Ort des Fahrstreifenwechsels.

Bild 3-11 zeigt die Geschwindigkeit über den Ort von zwei Fahrten eines Fahrers. Einmal durchfuhr er das Untersuchungsszenario mit Information (hellrot) und Warnung (dunkelrot) durch ein FAS (rote Linien) und einmal ohne FAS (blaue Linien). Dabei interessieren die in Bild 3-11 besonders gekennzeichneten Bereiche für die Art und Ausprägung der Reaktion.

Für die Untersuchung nach dem räumlichen oder zeitlichen Abstand zum Ereignis, an dem die Reaktion des Fahrers beginnt, ist die Betrachtung der Beschleunigungswerte gut geeignet, da dort die Fahrerreaktion direkter ablesbar ist (vgl Bild 3-12).

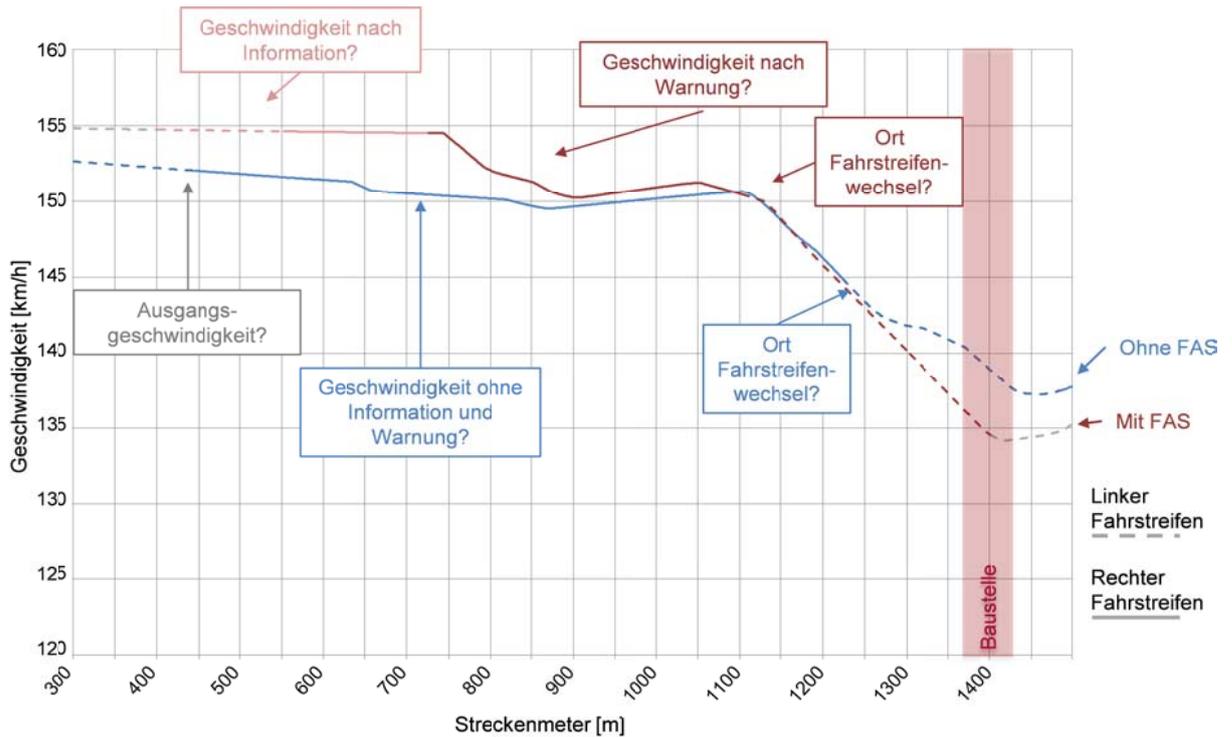


Bild 3-11: Baustelle: Verlauf von Geschwindigkeit und Fahrstreifennutzung in Relation zur Strecke für einen Fahrer aus der Fahrsimulation im Vergleich mit FAS und ohne FAS

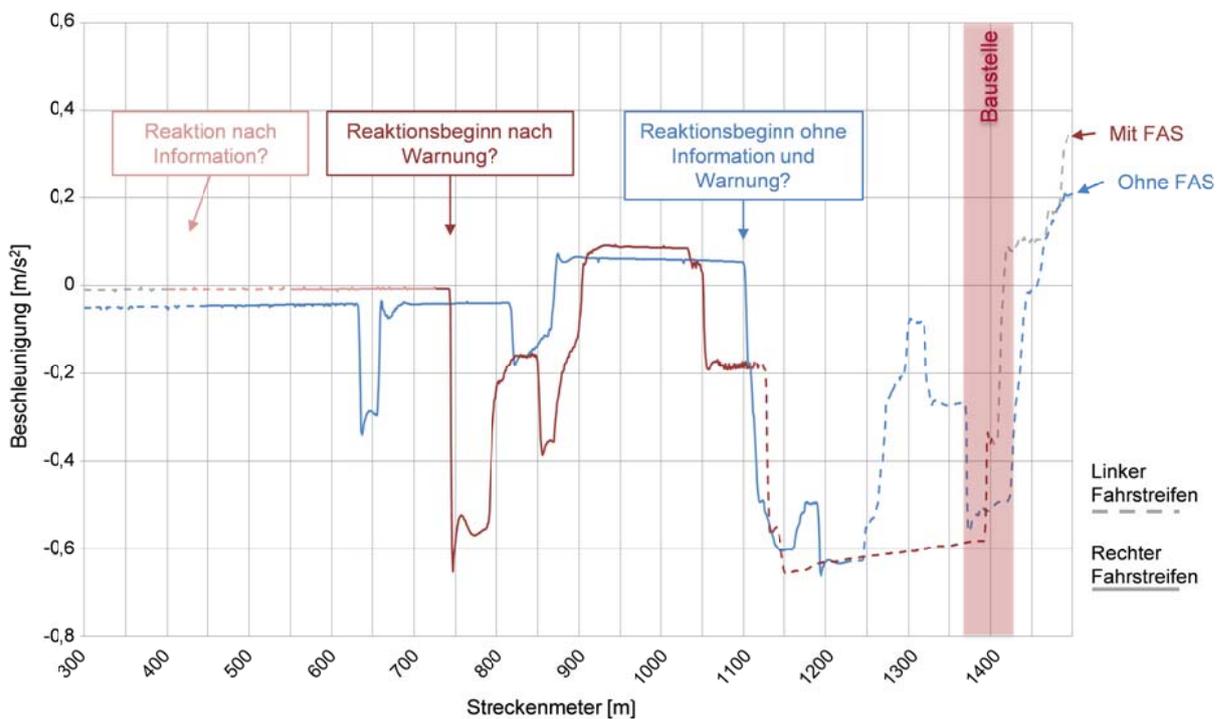


Bild 3-12: Baustelle: Verlauf der Beschleunigung in Relation zur Strecke für einen Fahrer aus der Fahrsimulation im Vergleich mit FAS und ohne FAS

Dasselbe Vorgehen wird für die Modellierung des Verhaltens am Stauende gewählt. Bild 3-13 zeigt die Geschwindigkeit über den Ort von zwei Fahrten eines Fahrers. Einmal durch-

fuhr er das Untersuchungsszenario mit Information (hellrot) und Warnung (dunkelrot) durch ein FAS (rote Linien) und einmal ohne FAS (blaue Linien).

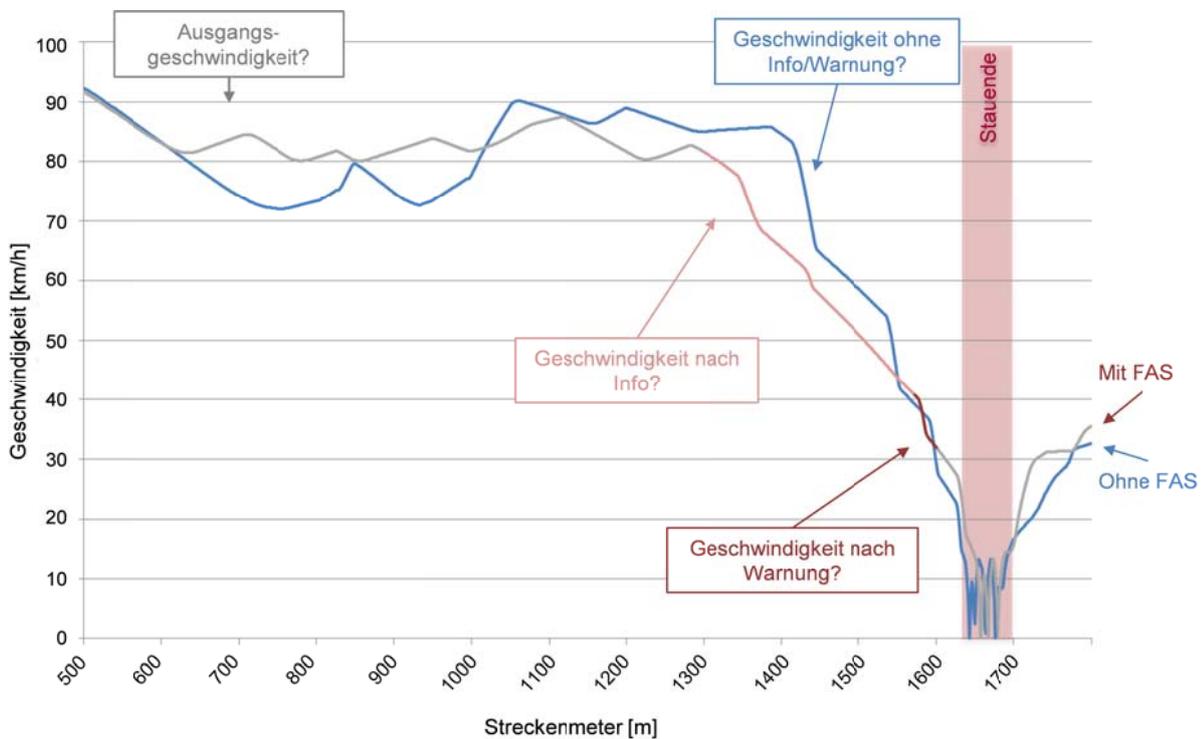


Bild 3-13: Stauende: Geschwindigkeit und Fahrstreifennutzung in Relation zur Strecke für einen Fahrer aus der Fahrsimulation jeweils mit FAS und ohne FAS

Im Folgenden wird exemplarisch detaillierter auf das Untersuchungsbeispiel Wanderbaustelle eingegangen. Das Vorgehen für die Modellierung der Annäherung an ein Stauende erfolgt analog.

Fahrerverhaltensänderung in Längsrichtung

Gemäß Bild 3-4 werden bei der Analyse der Eingangsdaten die zuvor getroffenen Annahmen aus Abschnitt 3.3.1 geprüft. Sofern die Annahmen zutreffen, werden anhand der Eingangsdaten stochastische Verteilungen generiert, die als Zufallsverteilungen in die Verkehrssimulation integriert werden. Sollte eine Hypothese über das Fahrerverhalten mit der untersuchten Kenngröße aus den Eingangsgrößen nicht bestätigt werden können, so wird die Hypothese an einer anderen geeigneten Kenngröße geprüft oder anhand der beobachteten Fahrerreaktionen wird eine neue Annahme über das Fahrerverhalten getroffen. Daraus ergeben sich Fragen über die Höhe der Ausgangsgeschwindigkeiten und welche Geschwindigkeit auf Höhe des Ereignisses gefahren werden. Ebenso muss untersucht werden, wann durchschnittliche Werte für situationsabhängige Geschwindigkeiten ermittelt werden sollten und wann die Betrachtung eines punktuellen Wertes z. B. von Extremwerten oder Zielwerten sinnvoller ist.

Der Vergleich der Minima, Maxima und Mittelwerte der Geschwindigkeiten über die Strecke der beiden Fahrergruppen, ohne FAS und mit FAS, zeigt bereits deutliche Unterschiede für den Zeitpunkt der Reaktion und die Stärke der Ausprägung, siehe z. B. Bild 3-14 für die Wanderbaustelle. Es wird deutlich, dass auch teilweise keine Reaktion - in Form einer veränderten Geschwindigkeit - auf das Ereignis stattfindet, siehe die Kurve für das Maximum. Die Situation kann also auch ohne Verhaltensänderung durchfahren werden.

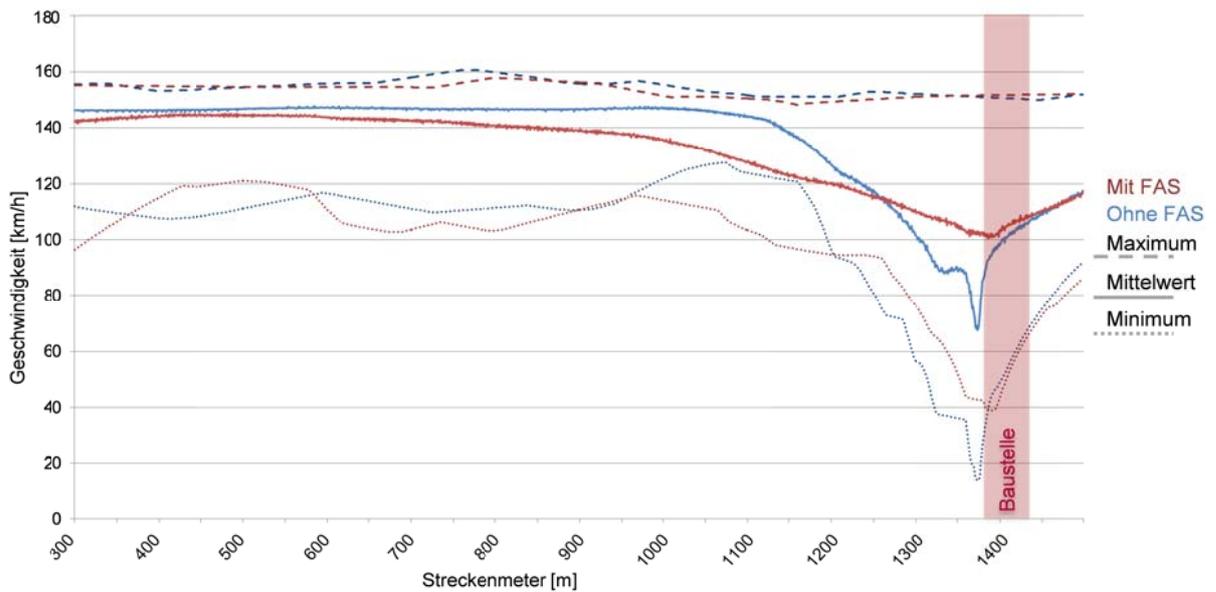


Bild 3-14: Minima, Mittelwert und Maxima der Geschwindigkeiten aller Fahrer in Relation zur Strecke aus der Fahrsimulation für die Wanderbaustelle jeweils mit FAS und ohne FAS

Für die detaillierte Untersuchung des Längsverhaltens werden die Fahrerdaten z. B. für die Situation Wanderbaustelle in verschiedenen Untergruppen untersucht. Bei einer der Fahrzeuggruppen ist eine direkte Reaktion notwendig: das Fahrzeug befindet sich vorher auf dem später gesperrten Fahrstreifen. Im Beispielfall der Wanderbaustelle fährt das Fahrzeug auf dem rechten Fahrstreifen und wechselt nach links. Bei der zweiten Gruppe ist keine direkte Reaktion notwendig: das Fahrzeug befindet sich vorher auf dem nicht betroffenen Fahrstreifen, im Beispiel auf dem linken Fahrstreifen.

Pro Fahrer werden für die Untersuchungsbeispiele jeweils Mittelwert, Median, Standardabweichung, Minimum und Maximum der Verteilungen pro betrachteter Größe berechnet (siehe exemplarisch die Ergebnisse für die Wanderbaustelle in Tabelle 3-1):

Tabelle 3-1: Kenngrößen der Eingangsdaten für das Beispiel Baustelle in Längsrichtung je Fahrergruppe

		Geschwindigkeit [km/h]						
		N	Mittelwert	Median	Standardabweichung	Minimum	Maximum	
vorher	alle	40	145,87	148,50	11,35	105,94	155,07	
links	ohne FAS	Minimum	8	105,56	100,59	17,25	82,12	128,64
		bei Ereignis	8	109,85	105,10	17,86	82,55	133,56
	mit FAS	Minimum	14	104,89	104,74	24,42	38,98	140,46
		bei Ereignis	14	111,58	110,91	20,58	66,49	151,80
	mit FAS - Info	Letzter Wert	14	141,16	147,71	12,97	114,92	154,38
		Minimum	14	138,40	143,87	13,34	105,20	148,98
		Standardabweichung	14	2,87	1,62	2,79	0,00	8,63
	mit FAS - Warnung	Letzter Wert	14	110,07	109,36	25,91	44,05	151,74
		Minimum	14	127,46	135,10	18,34	94,59	148,30
		Standardabweichung	14	13,07	9,06	8,24	4,09	32,48
rechts	ohne FAS	Minimum	7	135,76	143,76	135,76	87,79	149,09
		bei Ereignis	0	-	-	-	-	-
	mit FAS	Minimum	6	108,93	111,85	27,07	73,99	134,18
		bei Ereignis	0	-	-	-	-	-
	mit FAS - Info	Letzter Wert	6	139,95	144,66	15,70	120,26	154,52
		Minimum	6	138,64	140,72	15,81	120,26	154,52
		Standardabweichung	6	3,16	2,22	3,52	0,07	8,79
	mit FAS - Warnung	Letzter Wert	6	113,29	118,02	28,34	76,08	142,57
		Minimum	6	109,90	111,85	27,22	76,08	136,82
		Standardabweichung	6	9,92	8,94	5,23	3,86	16,75

Es wird angenommen, dass die Fahrerreaktionen einer Normalverteilung unterliegen. Die jeweils vorliegende Stichprobe wird auf Normalverteilung und damit Repräsentativität für die Grundgesamtheit getestet:

- H_0 : Die Stichprobe ist normalverteilt
- H_1 : Die Stichprobe ist nicht normalverteilt

Der Kolmogorov-Smirnov- und der Shapiro-Wilk-Test werden zur Überprüfung der Hypothesen durchgeführt (vgl. u. a. [SACHS, 1999], [SPSS, 2012]). Die Nullhypothese wird beibehalten für ein Signifikanzniveau von über 0,05. Signifikante Ergebnisse sind nachfolgend „fett“ markiert.

In Tabelle 3-2 sind die Testergebnisse für die Wanderbaustelle und die Werte des linken Fahrstreifens mit Fahrerassistenzsystem dargestellt. Tabelle 3-4 zeigt die Ergebnisse für den rechten Fahrstreifen mit FAS. Die Werte für alle weiteren Verteilungen der Wanderbaustelle können dem Anhang entnommen werden.

Tabelle 3-2: Ergebnisse für den Test auf Normalverteilung für die charakteristischen Geschwindigkeitswerte auf dem linken Fahrstreifen mit FAS

Tests auf Normalverteilung						
Linker Fahrstreifen mit FAS Geschwindigkeiten	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
Mit FAS - Minimum	0,211	14	0,092	0,888	14	0,076
Mit FAS - bei Ereignis	0,156	14	0,200	0,961	14	0,737
Info - Letzter Wert	0,321	14	0,000	0,797	14	0,005
Info - Minimum	0,324	14	0,000	0,774	14	0,002
Warnung - Letzter Wert	0,182	14	0,200	0,926	14	0,265
Warnung - Minimum	0,208	14	0,101	0,888	14	0,076

Tabelle 3-3: Ergebnisse für den Test auf Normalverteilung für die charakteristischen Geschwindigkeitswerte auf dem rechten Fahrstreifen mit FAS

Tests auf Normalverteilung						
Rechter Fahrstreifen mit FAS, Geschwindigkeiten	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
Mit FAS - Minimum	0,295	6	0,112	0,821	6	0,091
Info - Letzter Wert	0,226	6	0,200	0,833	6	0,113
Info - Minimum	0,229	6	0,200	0,848	6	0,150
Warnung - Letzter Wert	0,274	6	0,180	0,876	6	0,251
Warnung - Minimum	0,283	6	0,144	0,831	6	0,109

Folgende Werte können demnach für die Wanderbaustelle für beide Fahrstreifen als normalverteilt angenommen werden: die minimalen Geschwindigkeiten, die Geschwindigkeiten auf Höhe des Ereignisses, die letzten Geschwindigkeiten während der Warnphase und die minimalen Geschwindigkeiten während der Warnphase. Die Werte während der Informationsphase auf dem rechten Fahrstreifen sind ebenfalls normalverteilt, auf dem linken Fahrstreifen sind die Werte nicht normalverteilt. Die Daten für die Informationsphase auf dem linken Fahrstreifen werden daher detaillierter betrachtet. Der Vergleich des erwarteten Normalwertes und des beobachteten Normalwertes (siehe Bild 3-15) zeigt, dass es zwei unterschiedliche Verhaltensweisen gibt. Der eine Teil der Fahrer reagiert auf die Information, der andere Teil der Fahrer ändert das Verhalten nicht. Diese Daten repräsentieren also wiederum zwei unterschiedliche Fahrergruppen während der Informationsphase auf dem nicht betroffenen Fahrstreifen: Fahrer, die mit niedrigeren Geschwindigkeiten reagieren und Fahrer, die nicht reagieren.

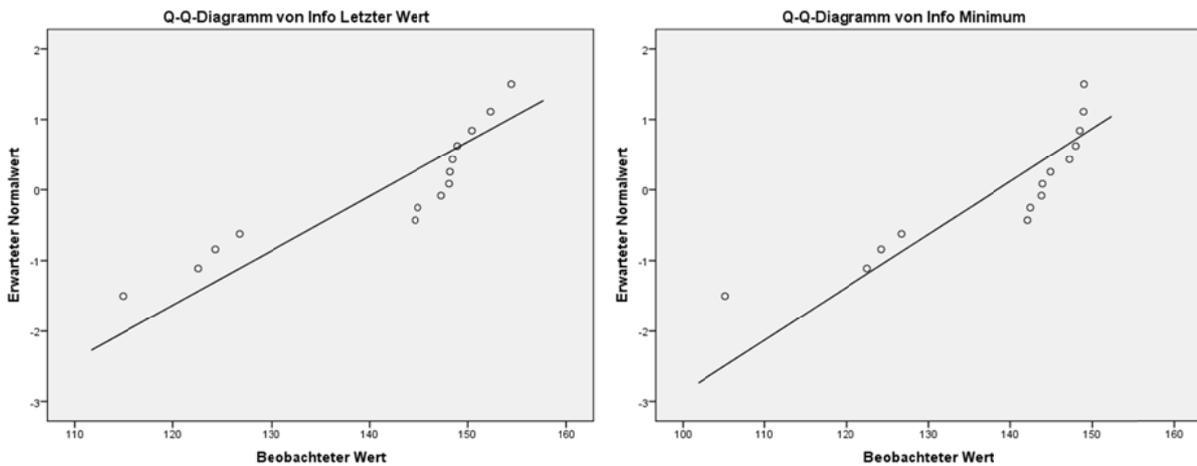


Bild 3-15: Erwarteter Normalwert und beobachteter Normalwert für die Reaktion bei der Wanderbaustelle nach der Information auf dem linken Fahrstreifen. Links: der letzte Geschwindigkeitswert und rechts: der minimale Geschwindigkeitswert während der Infophase

Nachdem die Daten hinsichtlich der Art der Verhaltensänderung untersucht wurden, ist der nächste Schritt die Untersuchung des Ortes der Verhaltensänderung in Längsrichtung. Bild 3-16 zeigt den Verlauf der mittleren Beschleunigung aller Fahrer auf dem linken Fahrstreifen jeweils mit und ohne FAS. Als Indikator für den Reaktionsbeginn wird, nach Sichtung der Daten, das Erreichen einer mittleren Verzögerung von mindestens $0,5 \text{ m/s}^2$ definiert. Der Reaktionsbeginn mit FAS auf dem linken Fahrstreifen erfolgt nach der Warnung bei rd. 400 Metern vor dem Ereignis und damit im Mittel rund 100 Meter früher als ohne FAS. Die Ergebnisse für den rechten Fahrstreifen finden sich im Anhang.

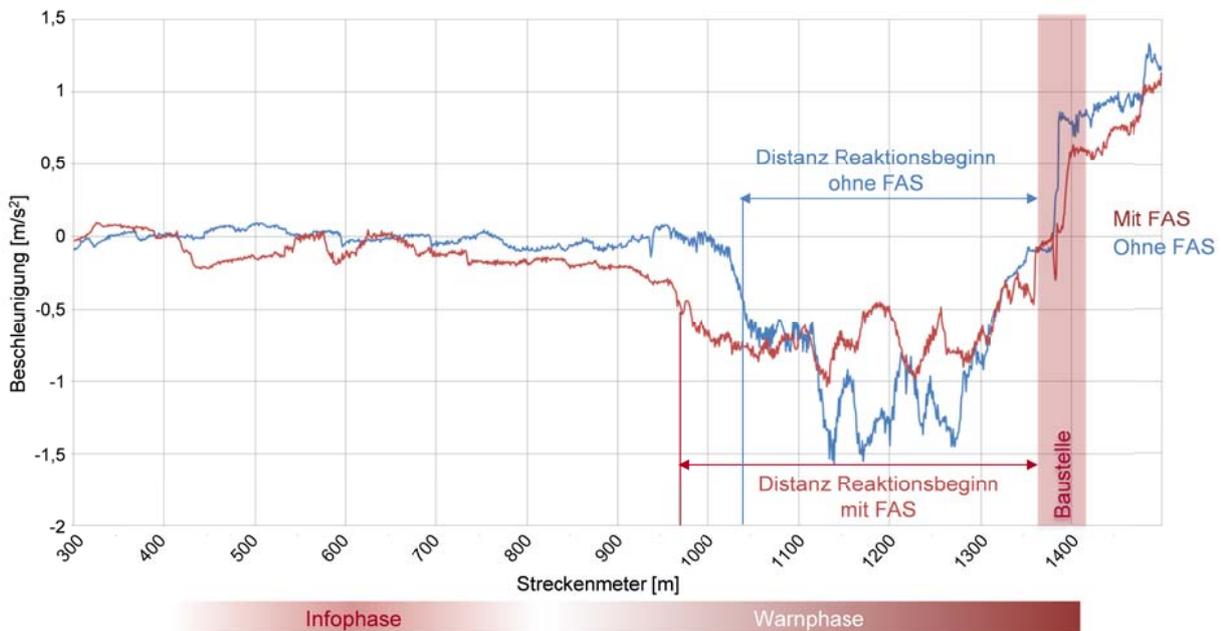


Bild 3-16: Mittelwert der Beschleunigung mit und ohne FAS in Relation zur Strecke mit durchschnittlichem Beginn und Ende von Info- und Warnphase für den linken Fahrstreifen

Fahrerverhaltensänderung in Querrichtung

Neben der Verhaltensänderung in Längsrichtung interessiert auch der Ort des Fahrstreifenwechsels. Die Fahrer, die sich bereits vor der kritischen Situation auf dem freien Fahrstreifen befanden (im Beispiel der linke), werden, sobald sie die Situation erfasst haben, nicht mehr vor dem Ereignis nach rechts wechseln.

Für die verschiedenen Fahrergruppen werden die Distanzen zum Ereignis zum Zeitpunkt des Fahrstreifenwechsels ermittelt. Nachfolgendes Bild 3-17 zeigt die Abstände zur Wanderbaustelle beim Fahrstreifenwechsel von rechts nach links, unterteilt für die beiden Fahrergruppen.

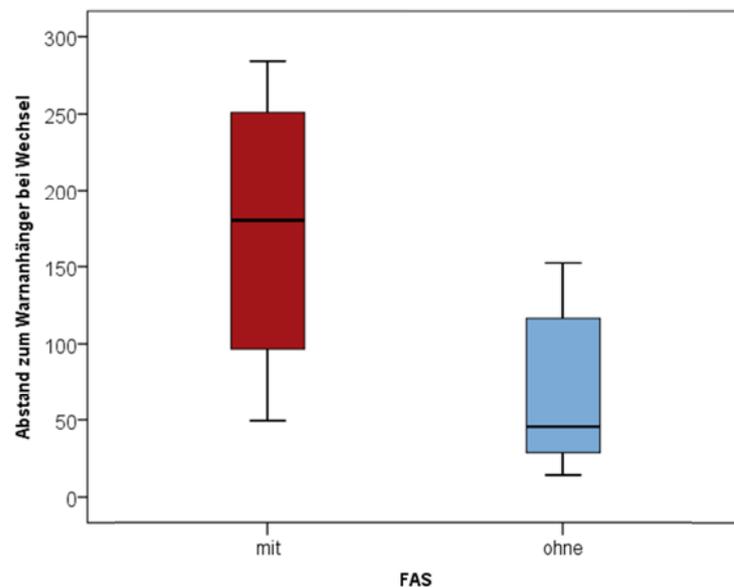


Bild 3-17: Boxplot für die Verteilung der Abstände des Fahrzeugs zur Wanderbaustelle beim Fahrstreifenwechsel mit und ohne FAS

Die horizontalen Striche in der Box repräsentieren den Median. Die Box entspricht dem Interquartilsabstand, d. h. dem Bereich, in dem die mittleren 50 % der Daten liegen. Die Antennen (Whisker) visualisieren die Daten, die nicht innerhalb des mittleren 50 %-Bereichs liegen, aber auch nicht Extremwerte oder Ausreißer sind, sie zeigen Maxima und Minima.

Im Fall der Fahrt mit FAS gibt es lediglich vier Fahrer, die den Fahrstreifen von rechts nach links wechseln müssen, alle anderen Fahrer befinden sich bereits vor Erhalt der Information auf dem linken Fahrstreifen. Die Stichprobe ist dadurch sehr gering. Der Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung kann daher nicht angewendet werden.

Tabelle 3-4 zeigt die Ergebnisse der Normalverteilungstests. Der Shapiro-Wilk-Test bestätigt eine Normalverteilung auch trotz der geringe Stichprobe für die Fahrer mit FAS. Für alle anderen Verteilungen wird ebenso die Normalverteilung durch beide Tests bestätigt.

Tabelle 3-4: Ergebnisse für die Tests auf Normalverteilung für die Abstände zur Wanderbaustelle beim Fahrstreifenwechsel mit und ohne FAS

Tests auf Normalverteilung							
	FAS	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
Abstand zum Warnanhänger beim Wechsel	mit	0,170	4	.	0,989	4	0,951
	ohne	0,217	12	0,124	0,868	12	0,061

Zur Untersuchung, ob die Einflüsse des FAS auf den Ort des Fahrstreifenwechsels signifikant sind, wird eine Varianzanalyse (ANOVA von Englisch: Analysis of Variance) durchgeführt. Die Testhypothesen sind folgende:

- Allg: $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$, in diesem Fall: $H_0: \mu_{mit} = \mu_{ohne}$
- H_1 : Mindestens ein Erwartungswert ist unterschiedlich von den anderen.

Eine Voraussetzung für die Anwendung der ANOVA ist, dass die Varianzen auf Homogenität untersucht werden. Dafür wird der Levene Test durchgeführt (siehe Tabelle 3-5). Bei einem Signifikanzniveau von größer 0,05 kann davon ausgegangen werden, dass die Stichproben aus Grundgesamtheiten mit homogenen Varianzen stammen.

Tabelle 3-5: Ergebnisse für die Tests auf Homogenität der Varianzen für die Abstände zur Wanderbaustelle beim Fahrstreifenwechsel mit und ohne FAS

Test der Homogenität der Varianzen			
Abstand zum Warnanhänger bei Wechsel			
Levene-Statistik	df1	df2	Signifikanz
3,777	1	14	0,072

Die Daten können als normalverteilt mit homogenen Varianzen angenommen werden. Mit Hilfe einer Varianzanalyse kann daher untersucht werden, ob sich die Abstände beim Fahrstreifenwechsel mit und ohne FAS signifikant unterscheiden (siehe Tabelle 3-6).

Tabelle 3-6: ANOVA für den Einfluss von FAS auf den Abstand beim Fahrstreifenwechsel

Einfaktorielle ANOVA					
Abstand zum Warnanhänger bei Wechsel					
	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Zwischen den Gruppen	32745,512	1	32745,512	7,645	0,015
Innerhalb der Gruppen	59965,967	14	4283,283		
Gesamt	92711,480	15			

Das Signifikanzniveau liegt unter 0,05, daher muss die Nullhypothese abgelehnt werden. Dies bedeutet: es gibt signifikante Unterschiede in den beiden Verteilungen mit und ohne FAS.

3.3.3 Modellierung des Verhaltens in Längsrichtung

Für die Modellierung des Verhaltens in Längsrichtung wird das aktuell in VISSIM integrierte Fahrzeugfolgmodell basierend auf WIEDEMANN [1974] und dessen Aktualisierung von 1991 verwendet (vgl. Abschnitt 2.4.4.4 Vissim). Das Modell wird allerdings im Bereich der sicherheitskritischen Situation manipuliert, um das Fahrerverhalten in der Verkehrssimulation an die beobachteten Daten anzupassen. Ausgehend von bestimmten „Stimuli“ (Bezeichnung für Reize, die eine Reaktion auslösen) wird das Fahrerverhalten über die Zuweisung neuer Wunschgeschwindigkeitsverteilungen manipuliert. Im Fahrerfolgmodell nach Wiedemann beeinflusst die Höhe der gefahrenen Geschwindigkeit die Wahrnehmungsschwellen und damit ändert sich auch das Fahrzeugfolgeverhalten.

Die Wunschgeschwindigkeit ist im Zusammenhang mit der vorliegenden Fragestellung eine sehr gut geeignete Stellgröße für die Verkehrssimulation. Bei der Manipulation und situationsabhängigen Zuweisung einer neuer Wunschgeschwindigkeit aus einer für die jeweilige Situation angepassten Wunschgeschwindigkeitsverteilung wird darauf geachtet, dass beim „Ziehen“ eines Zufallswertes stets im gleichen Bereich der jeweiligen Verteilung (vor der Situation - während der Situation - nach der Situation) gezogen wird. So kann gewährleistet werden, dass der jeweilige Fahrer über die Situationen hinweg ähnliche Charakteristiken behält (vgl. Bild 3-1). Das heißt, es wird durch das Modell berücksichtigt, dass ein langsamer Fahrer vor der Situation, auch während der kritischen Situation zu den langsameren Fahrern gehört und danach auch wieder dasselbe Fahrerverhalten erhält wie zuvor.

Die Untersuchung der Basisdaten aus der Fahrsimulation hat für beide Untersuchungsbeispiele mit den jeweiligen Fahrergruppen und Annäherungssituationen Erkenntnisse über die Art und Weise der Fahrerverhaltensänderung und über die Orte bzw. Zeitpunkte des Reaktionsbeginns ergeben. Für diese unterschiedlichen Gruppen werden jeweils Wunschgeschwindigkeitsverteilungen generiert, die den Fahrer-Fahrzeug-Einheiten für die unterschiedlichen „Reaktionsbeginne“ zugewiesen werden.

Für die Erzeugung dieser Wunschgeschwindigkeitsverteilungen gibt es zwei unterschiedliche Möglichkeiten. Einerseits die Verwendung einer angenommenen Verteilungsfunktion, basierend auf den Werten der Stichprobe und andererseits die Verwendung der tatsächlich beobachteten Werte aus der Stichprobe.

Die erste Möglichkeit hat den Vorteil, dass die Verteilung harmonischer ist, da evtl. zufällige Ausreißer in der Stichprobe in der Modellierung nicht berücksichtigt werden und keine Sprünge in den Daten vorhanden sind, die ggf. einer zu geringen Stichprobengröße geschuldet sind. Fast alle charakteristischen Kenngrößen, die aus den Daten der Fahrsimulation ermittelt wurden, konnten als normalverteilt getestet werden. Bei der Reaktion der Fahrer auf die Baustelleninformation auf dem „freien“, linken Fahrstreifen war dies nicht möglich. Die genauere Betrachtung der Daten lässt auf zwei unterschiedliche Arten der Fahrerreaktion auf eine Information schließen, da nur ein Teil der Fahrer auf die Information durch das FAS mit einer geringeren Geschwindigkeit reagierte. Diese Effekte lassen sich durch die Verwendung

der tatsächlich beobachteten Werte aus der Stichprobe abbilden oder durch die Aufteilung dieser Gruppe in zwei Untergruppen.

Im Folgenden werden exemplarisch beide Möglichkeiten der Generierung von Wunschgeschwindigkeitsverteilungen dargestellt (siehe Bild 3-18):

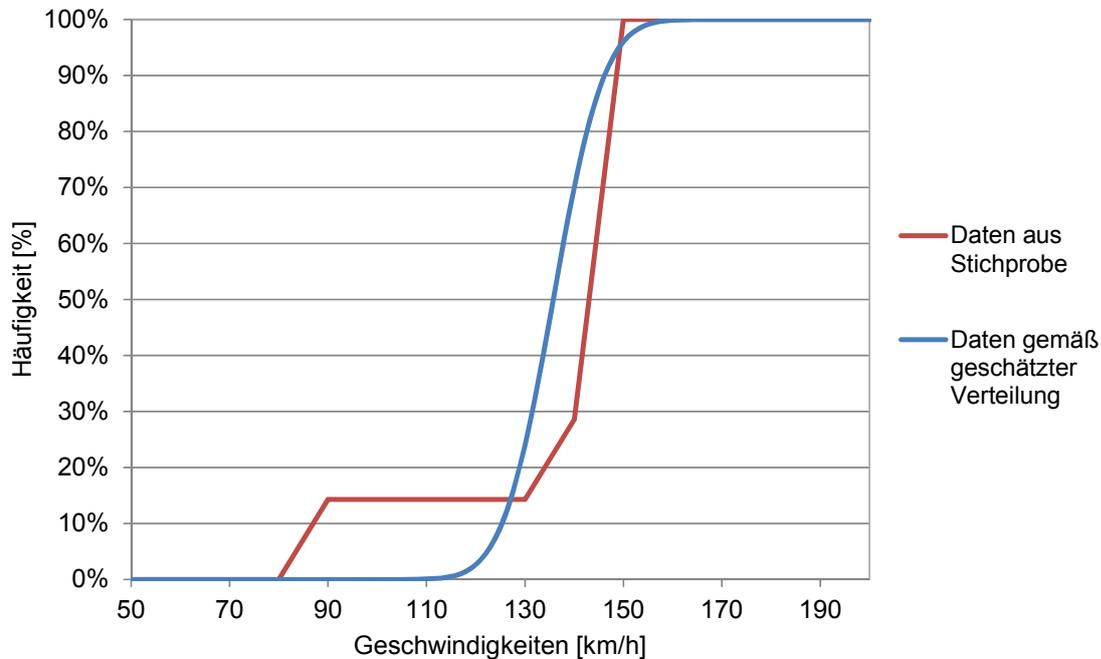


Bild 3-18: Möglichkeiten zur Generierung von Wunschgeschwindigkeitsverteilungen, rot Summenverteilung direkt aus der Stichprobe, blau: Summenverteilung gemäß geschätzter Normalverteilung

Wenn man bei einer größeren Stichprobe von einer gleichmäßigeren Summenlinie auch aus den Daten der Stichprobe ausgehen kann, dann werden sich die beiden Kurven ähneln. Bild 3-18 zeigt „Ausreißer“ in den Realdaten im niedrigen Geschwindigkeitsbereich, die in der geschätzten Normalverteilung nicht abgebildet würden.

In der vorliegenden Arbeit soll exemplarisch das Vorgehen für die Modellierung basierend auf Realdaten untersucht werden. Die vorliegende Stichprobe ist gerade nach der notwendigen Unterteilung der 20 Versuchsfahrer in die verschiedenen Fahrergruppen (Fahrstreifenwechsel notwendig oder nicht), teilweise sehr gering und es lassen sich basierend auf diesen Daten keine gesicherten allgemeingültigen Aussagen ableiten.

In der vorliegenden Fragestellung geht es allerdings darum, zu untersuchen, ob das in den Basisdaten beobachtet Fahrerverhalten in der gleichen Weise in der Verkehrssimulation abgebildet werden kann. Daher wird gemäß des Vorgehensmodells zur Modellierung die Qualität der Eingangsdaten überprüft. Es muss bei der späteren Interpretation der Ergebnisse der Verkehrssimulation hinsichtlich der Wirksamkeit des Systems beachtet werden, dass die Ergebnisse aufgrund der geringen Stichprobe der Eingangsdaten ggf. nicht repräsentativ für das zu erwartende Verhalten sind. Aus diesem Grund - das Ziel ist die Überprüfung, ob das

vorliegende, real gemessene Verhalten so in der Verkehrssimulation abgebildet werden kann - werden die Daten direkt aus der Stichprobe mit den dort vorhandenen Sprüngen und Ausreißern für die weitere Modellierung verwendet.

Modellierung des Verhaltens in Längsrichtung bei einer Wanderbaustelle

Im Folgenden sind die für die Modellierung verwendeten Summenhäufigkeiten der Geschwindigkeiten je Fahrstreifen (Bild 3-19 und Bild 3-20) für die Annäherung an eine Wanderbaustelle dargestellt: die Verteilung der Ausgangsgeschwindigkeit aller Fahrzeuge vor der Untersuchungssituation (vorher_alle), die Verteilung der Geschwindigkeiten der Fahrzeuge nach dem Erhalt einer Information (mit_Info) und die Verteilung der Geschwindigkeiten der Fahrzeuge nach dem Erhalt einer Warnung (mit_Warnung).

Die Geschwindigkeiten auf dem rechten Fahrstreifen (Bild 3-19) fallen im Mittel höher aus, als die Geschwindigkeiten auf dem linken Fahrstreifen (Bild 3-20). Dies kann daran liegen, dass die Geschwindigkeiten für den rechten Fahrstreifen nur für die Situation vor dem Fahrstreifenwechsel gelten und noch in größerer Entfernung zum Ereignis gefahren werden.

Die Fahrzeuge mit FAS erhalten die neuen Wunschgeschwindigkeiten je nach Fahrstreifen, jeweils nachdem sie gemäß Funktionsspezifikation und Kommunikationsmodell eine Information oder Warnung im Fahrzeug angezeigt bekommen hätten. Die Fahrer-Fahrzeug-Einheiten beginnen daraufhin ihr Verhalten anzupassen. Der umgebende Verkehr wird weiterhin für die tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit berücksichtigt. Nachdem das Fahrzeug die Baustelle passiert hat und die Warnung deaktiviert wird, wird der Fahrer-Fahrzeug-Einheit wieder die Wunschgeschwindigkeit zugewiesen, die sie vor der kritischen Situation hatte.

Für die Fahrzeuge ohne FAS wird der Reaktionsbeginn aus den Daten der Fahrsimulation je Fahrstreifen verwendet. Das heißt, im Abstand von rd. 200 bis 300 Metern vor der Baustelle wird den Fahrern die jeweils neue Wunschgeschwindigkeit zugewiesen. Nachdem das Fahrzeug die Baustelle passiert hat, wird der Fahrer-Fahrzeug-Einheit wieder die Wunschgeschwindigkeit zugewiesen, die sie vor der kritischen Situation hatte.

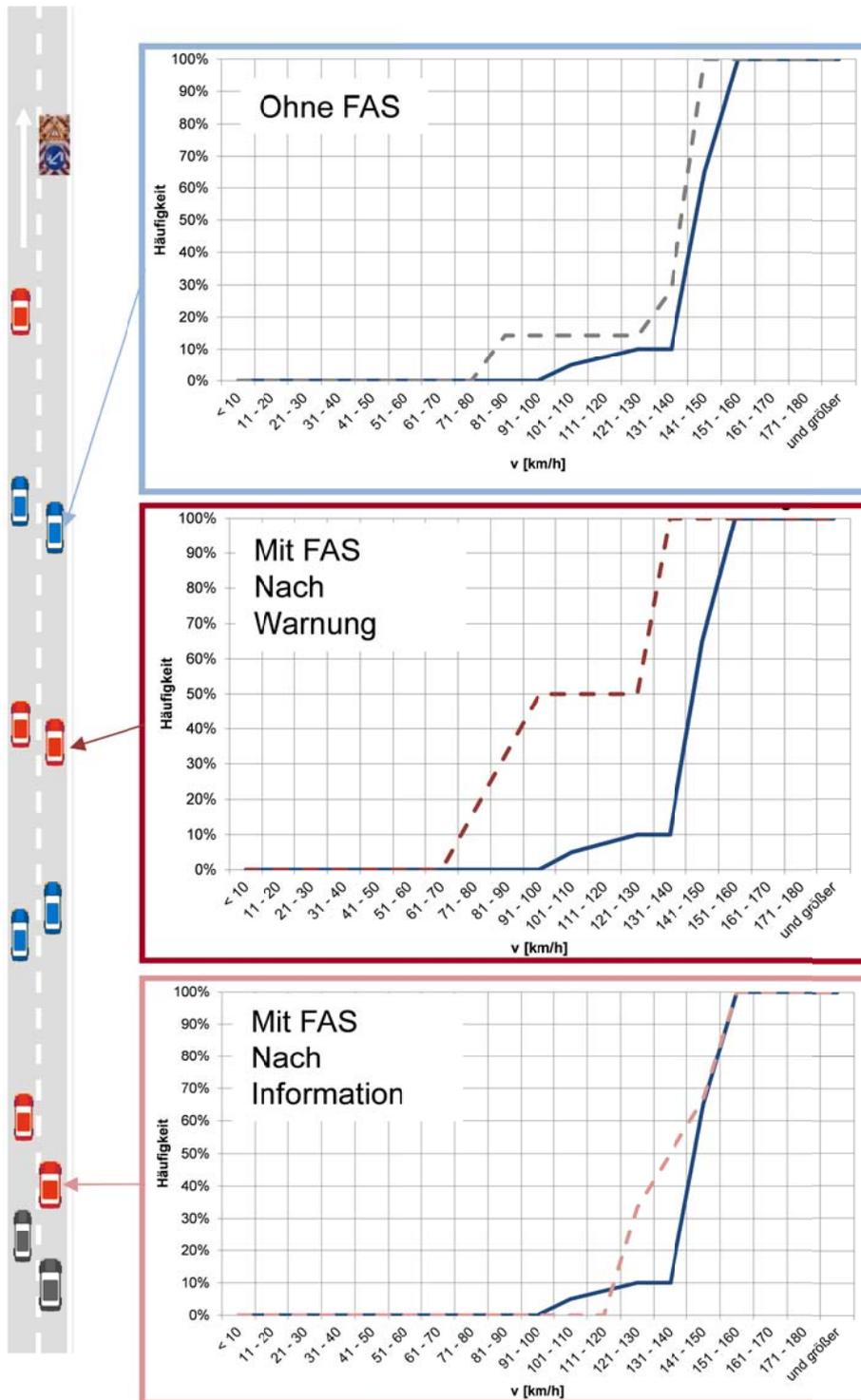


Bild 3-19: Wunschgeschwindigkeitsverteilungen für die Wanderbaustelle bei Anfahrt auf dem gesperrten Fahrstreifen als Summenhäufigkeiten aus Realdaten als Reaktion auf eine Wanderbaustelle für die unterschiedlichen Fahrergruppen und Fahrsituationen - jeweils in Relation zur Ausgangsgeschwindigkeit aller Fahrzeuge (blau, durchgezogen) - ohne FAS (grau, gestrichelt), mit Info (hellrot, gestrichelt) und mit Warnung (dunkelrot)

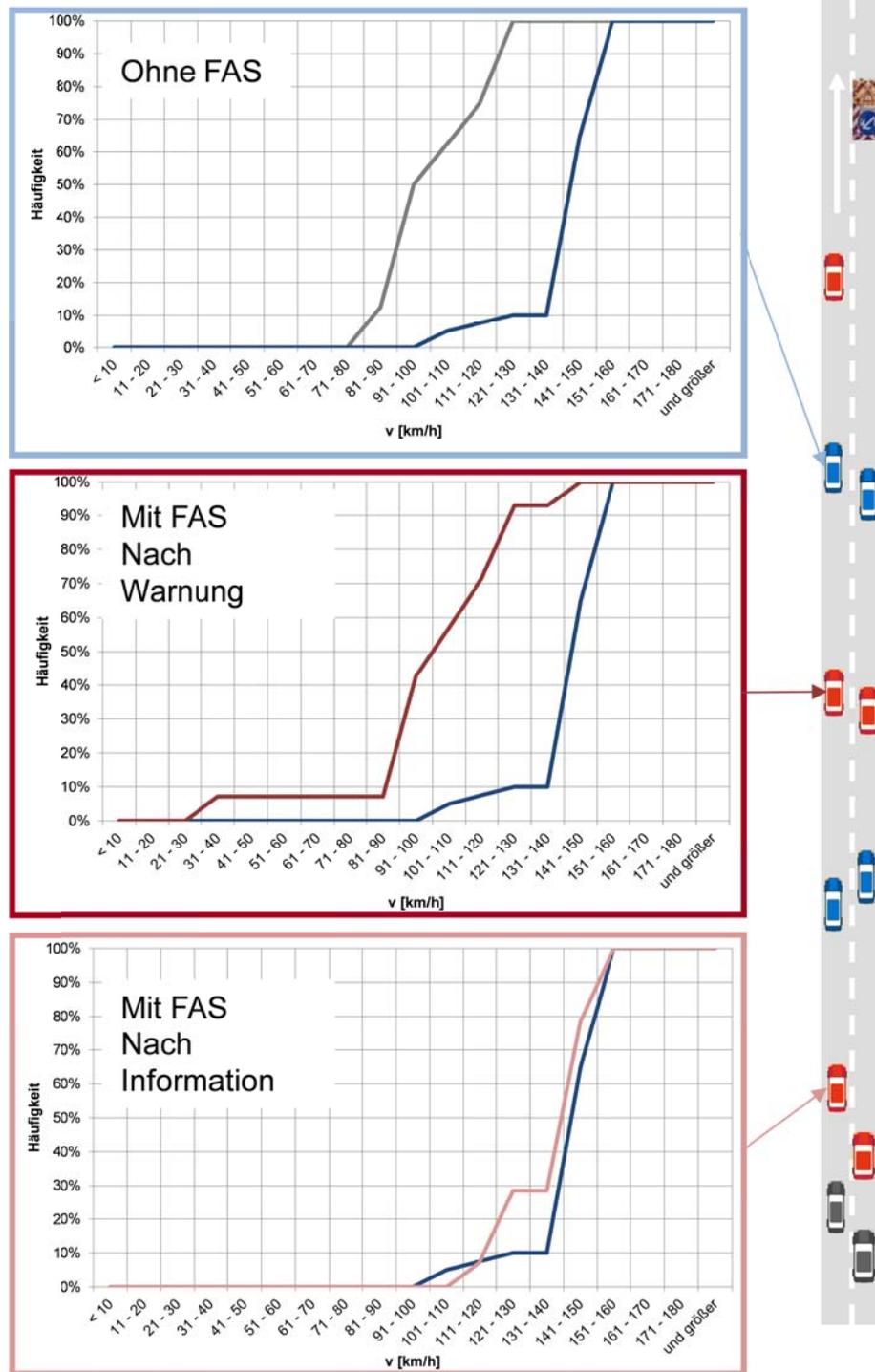


Bild 3-20: Wunschgeschwindigkeitsverteilungen für die Wanderbaustelle bei Anfahrt auf dem freien Fahrstreifen als Summenhäufigkeiten aus Realdaten als Reaktion auf eine Wanderbaustelle für die unterschiedlichen Fahrergruppen und Fahrsituationen - jeweils in Relation zur Ausgangsgeschwindigkeit aller Fahrzeuge (blau) - ohne FAS (grau), mit Info (hellrot) und mit Warnung (dunkelrot)

Modellierung des Verhaltens in Längsrichtung bei Annäherung an ein Stauende

Im Folgenden (siehe Bild 3-21) sind die für die Modellierung verwendeten Summenhäufigkeiten der Geschwindigkeiten für die Annäherung an ein Stauende dargestellt: die Verteilung der Ausgangsgeschwindigkeit aller Fahrzeuge vor der Untersuchungssituation (vorher_alle) und die Verteilung der Geschwindigkeiten der Fahrzeuge nach dem Erhalt einer Warnung (mit FAS - Warnung). Den Fahrzeugen ohne FAS wird kein geändertes Fahrerverhalten zugewiesen.

Die Fahrzeuge mit FAS erhalten in der Verkehrssimulation die neuen Wunschgeschwindigkeiten jeweils nachdem sie gemäß Funktionsspezifikation und Kommunikationsmodell eine Information oder Warnung im Fahrzeug angezeigt bekommen hätten. Daraufhin beginnen die Fahrer-Fahrzeug-Einheiten ihr Verhalten dementsprechend anzupassen. Der umgebende Verkehr wird weiterhin für die tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit berücksichtigt. Nachdem das Fahrzeug das Stauende passiert hat und die Warnung deaktiviert wird, wird der Fahrer-Fahrzeug-Einheit wieder die Wunschgeschwindigkeit zugewiesen, die sie vor der kritischen Situation hatte.

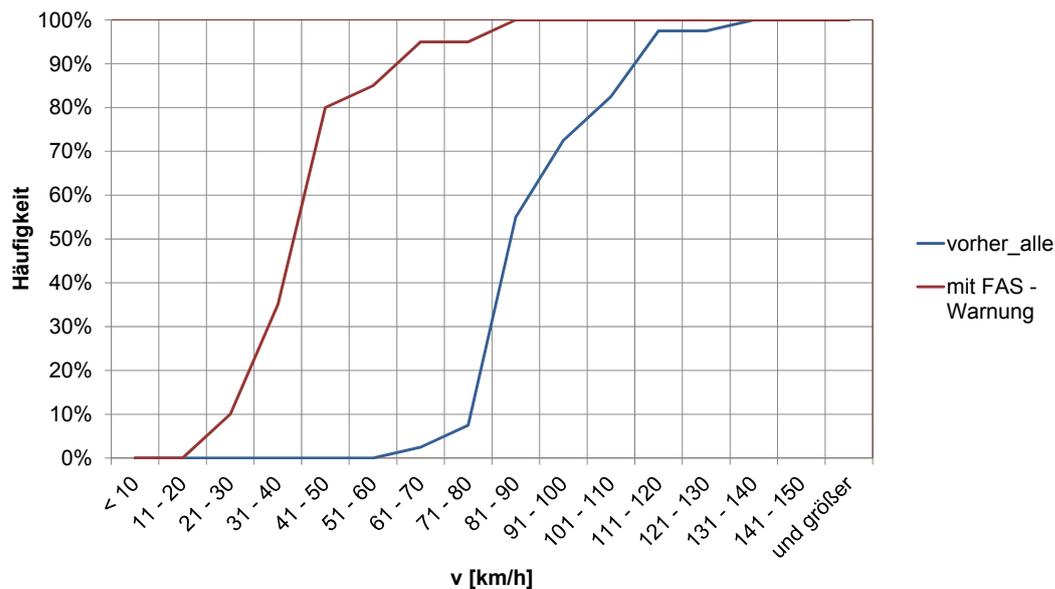


Bild 3-21: Wunschgeschwindigkeitsverteilungen für die Annäherung an ein Stauende als Summenhäufigkeiten aus Realdaten in Relation zur Ausgangsgeschwindigkeit aller Fahrzeuge (blau), mit Info (hellrot) und mit Warnung (dunkelrot)

3.3.4 Modellierung des Verhaltens in Querrichtung

Die Fahrstreifenwechsel werden für die Annäherung an die Wanderbaustelle ebenso gemäß der beobachteten Verteilung in den Daten aus der Fahrsimulation modelliert:

- Die Fahrzeuge ohne FAS erhalten den Wunsch, den Fahrstreifen zu wechseln in dem Abstand zur Wanderbaustelle, der dem durchschnittlichen Abstand aus den Basisdaten entspricht.

- Die Fahrzeuge mit FAS erhalten einen neuen Fahrstreifenwunsch, jeweils nachdem sie gemäß Funktionsspezifikation der Warnung vor der Baustelle und Kommunikationsmodell eine Information oder Warnung im Fahrzeug erhalten und angezeigt bekommen hätten.

3.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In diesem Kapitel wurde der Modellierungsansatz zunächst allgemein vorgestellt. Der vorliegende Modellierungsansatz basiert auf realen räumlich und zeitlich detaillierten Fahrerdaten verschiedener Fahrer in einer vergleichbaren Untersuchungssituation. Anhand dieser Daten werden typische Fahrerreaktionen auf das Ereignis identifiziert. Diese Fahrerreaktionen münden in stochastische Verteilungen charakteristischer Fahrerverhaltensparameter. Ziel ist es, dass Fahrerverhalten lediglich in dem Bereich der verkehrssicherheitskritischen Situation zu verändern.

Basierend auf zwei Anwendungsbeispielen, der Warnung vor einer Baustelle und der Warnung vor einem Stauende, werden mögliche Untersuchungskonzepte für die Wirkungsanalyse und die Modellierung der Untersuchungssituationen exemplarisch vorgestellt.

Darauf aufbauend wird der Ansatz für die Modellierung des Fahrerverhaltens für die Beispiele angewendet. Für die Untersuchung der realen Fahrerdaten wurden zunächst grundlegende Annahmen für das mögliche Fahrerverhalten in den jeweiligen Situationen getroffen, um die zu modellierende Situation in handhabbare Teilaspekte zu gliedern. Die vorhandenen Eingangsdaten für die Modellierung wurden aufbereitet und analysiert.

Bei der Modellierung der Anwendungsbeispiele wird ausgehend von modellierten „Stimuli“ in der Verkehrssimulation das Fahrerverhalten über die Zuweisung neuer Wunschgeschwindigkeitsverteilungen oder eines Fahrstreifenwechselwunsches manipuliert. Die entsprechenden Verteilungen für das modellierte Längs- und Querverhalten wurden aus den analysierten Daten erzeugt.

Die vorliegende Stichprobe der Eingangsdaten ist nach der notwendigen Unterteilung der Versuchsfahrer in verschiedenen Fahrer-Teilgruppen teilweise sehr gering und es lassen sich damit keine gesicherten allgemeingültigen Aussagen ableiten. Für signifikante Aussagen zum Fahrerverhalten sind größere Stichproben notwendig. Je nach Effektstärke und Streuung der Ergebnisse unterscheidet sich die notwendige Stichprobengröße für signifikante Ergebnisse. In der vorliegenden Arbeit wird allerdings untersucht, ob der vorgestellte Modellierungsansatz prinzipiell machbar ist. Das heißt, ob das in den Basisdaten beobachtete Fahrerverhalten in der geplanten Weise in der Verkehrssimulation abgebildet werden kann. Diese prinzipielle Machbarkeitsuntersuchung ist auch mit der geringen Stichprobe möglich.

4 MODELLANWENDUNG UND BEWERTUNG

Zunächst werden die Rahmenbedingungen für die Anwendung des Modells bei der Durchführung in der Verkehrssimulation dargestellt. Es wird erläutert, welcher Auswertebereich gewählt wird und welche Anzahl an Simulationsdurchläufen notwendig ist, um eine gewählte statistische Sicherheit zu erreichen. Ob das Fahrerverhalten, das in der Verkehrssimulation abgebildet wird, mit dem Fahrerverhalten übereinstimmt, das in den gemessenen Daten realer Fahrer vorgefunden wurde, wird in dem Abschnitt „Validierung der Verkehrssimulation“ dargestellt. Nach der Durchführung der Verkehrssimulation werden die zuvor vorgestellten Kenngrößen zur verkehrssimulationsbasierten Ermittlung der Wirksamkeit von ITS und FAS ausgewertet und diskutiert. Abschließend wird das vorgestellte Vorgehen in Bezug auf Praktikabilität und Aussagekraft der Ergebnisse überprüft und hinterfragt.

4.1 Durchführung der Verkehrssimulationen

Der folgende Abschnitt beinhaltet die Dokumentation der Randbedingungen unter denen die Verkehrssimulationen für die exemplarische Modellanwendung und Bewertung durchgeführt wurde. Neben der kurzen Beschreibung der verwendeten Parameter wird erläutert, wie bei der Auswahl des Auswertungsbereichs vorgegangen wurde. Es wird ermittelt, welche Anzahl an Simulationsdurchläufen notwendig ist, um eine gewählte statistische Sicherheit zu erreichen und repräsentative Aussagen zu erzielen.

4.1.1 Verwendete Parameter

Für die Modellierung der Situationen Wanderbaustelle und Stauende wird für den Zeitbereich der sicherheitskritischen Situation das Fahrerverhalten der Fahrzeuge anhand der Erkenntnisse aus den Daten aus der Fahrsimulation angepasst und über eine Schnittstelle überschrieben. Für die Zeiten des „normalen Fahrerverhaltens“, also vor und nach der Situation, werden die Standard-Vissim-Parameter für die Modellierung verwendet.

4.1.2 Auswahl des Auswertungsbereichs

In diesem Abschnitt wird erläutert, wie und warum sich der *Auswertungsbereich* von dem *Simulationsbereich* unterscheidet.

Die Entscheidung über die Größe des *Simulationsbereichs*, also welcher räumlicher und zeitlicher Umgriff in der Verkehrssimulation umgesetzt wird, ist abhängig von der jeweiligen Fragestellung der Analyse. Es sollte immer ein Netz simuliert werden, welches räumlich größer ist als das für die eigentliche Fragestellung direkt notwendige Netz. Auch der zeitliche Umgriff sollte größer als die Dauer der eigentlichen Untersuchungssituation gewählt werden. Das liegt daran, dass im Vorfeld der Untersuchungssituation erst eine realistische Verkehrs-

nachfrage und realistisches Fahrerverhalten erzeugt werden müssen. Dies baut sich meist erst mit der Zeit auf und ist häufig nicht direkt an den räumlichen und zeitlichen Rändern der Simulation modellierbar. Soll beispielsweise ein bestimmter Verkehrszustand untersucht werden, muss sich dieser erst aufbauen. Die Fahrzeuge müssen sich in ausreichender Anzahl auf die zu untersuchenden Stellen im Netz verteilt haben. Die eigentliche Untersuchungssituation hat häufig auch großräumigeren Einfluss auf die Umgebung [vgl. auch FGSV, 2006].

Bei der Wahl des *Auswertebereichs* muss aber darauf geachtet werden, dass der Umfang nicht zu groß ist. Auch dieser ist abhängig von der jeweiligen Fragestellung der Analyse. Werden z. B. Mittelwerte bestimmter Kenngrößen für die Wirkungsanalyse betrachtet, so sollte der Auswertebereich räumlich und zeitlich nicht größer sein als der potenzielle Wirkbereich der jeweiligen zu untersuchenden Funktion. So kann vermieden werden, dass die Mittelwerte durch untersuchungssituationsfremde Werte „verwässert“ werden. Für den Vergleich der beiden Fahrzeuggruppen oder Situationen mit und ohne ITS oder FAS muss jeweils der gleiche Bereich genutzt werden. Dieser besteht aus dem potenziellen Wirkbereich der Funktion - auch für den Fall ohne Funktion. Bestimmte Effekte einer Funktion können durch weiteres Einschränken des Auswertebereichs und den Vergleich der unterschiedlichen Ergebnisse ggf. sichtbarer werden. In jedem Fall ist die Dokumentation der jeweils getroffenen zeitlichen und räumlichen Einschränkungen des Auswertebereichs sehr wichtig. Die Interpretation der Ergebnisse muss immer in Relation zu diesen Randbedingungen erfolgen.

Für die Wirkungsanalyse im Untersuchungsbeispiel Baustelle (vgl. Bild 4-1) wird als Beginn des Auswertebereichs der Ort festgelegt, an dem am weitesten von der Wanderbaustelle entfernt eine Information im Fahrzeug mit FAS angezeigt wurde. Dies ist der Beginn des potenziellen Wirkbereichs. Das Ende des Auswertebereichs ist durch den Anfang der Wanderbaustelle gekennzeichnet. Nachdem herausgefunden werden soll, wie sich unterschiedliche Ausstattungsraten mit diesem System auf die Verkehrssicherheit des Fahrzeugkollektivs im Vorfeld der Baustelle auswirken (siehe Abschnitt 3.2.3), werden in diesem Beispiel nur Daten von Fahrzeugen ausgewertet, die sich stromaufwärts von der Baustelle befinden. Der Simulationsbereich wird wesentlich größer gewählt. Die genaue Beschreibung des zeitlichen und räumlichen Bereichs findet sich in Abschnitt 3.2.3 Untersuchungskonzepte und Modellierung der Untersuchungssituation.



$$\text{Beginn Auswertebereich} =$$

$$\max [\text{Distanz bei Erhalt einer Nachricht Fzg } 1, \dots, \text{Distanz bei Erhalt einer Nachricht Fzg } n]$$

Bild 4-1: Definition für den Beginn und das Ende des Auswertebereichs

Der Auswertebereich für die Wirkungsanalyse für das Beispiel Stauende wird ähnlich festgelegt. Der Beginn ist der Ort, an dem an weitesten Entfernt von dem Stauende eine Information im Fahrzeug mit FAS angezeigt wurde. Allerdings ist dieser Ort in diesem Fall nicht fest über die Zeit, sondern wandert ebenso wie das eigentliche Stauende stromaufwärts.

4.1.3 Notwendige Anzahl an Simulationsdurchläufen

Verkehrssimulationen bilden die Stochastizität des Verkehrsablaufs ab. Für die Wirkungsermittlung von ITS und FAS sollten sich die Ergebnisse nicht auf einen „zufälligen“ Simulationsdurchlauf stützen. Daher müssen die Aussagen aus der Verkehrssimulation auf einer ausreichend großen Anzahl an Simulationsdurchläufen basieren, um so den Einfluss der Zufälligkeit auf die Ergebnisse zu minimieren. Erst die Zusammenfassung mehrerer Simulationsdurchläufe durch z. B. Mittelwertbildung und Standardabweichung liefert Aussagen über die Wirkpotenziale.

Die notwendige Anzahl an Simulationsdurchläufen ist abhängig von Mittelwert und Streuung der betrachteten Kenngrößen über die unterschiedlichen Simulationsdurchläufe. Zur Ermittlung der Anzahl der notwendigen Durchläufe n werden pro Kenngröße ein gewünschtes Signifikanzniveau und Konfidenzintervall festgelegt (vgl. auch BAUR & HOFFMANN [2013]). Für die initiale Durchführung der Simulationen von $n = 5$ werden die Varianzen der Kenngrößen berechnet. Die anschließende Berechnung der notwendigen Anzahl an Simulationsläufen n erfolgt nach folgender Formel [vgl. auch FGSV, 2006, FHWA, 2004]:

$$n = \frac{t(\alpha, n - 1)^2 \cdot s^2}{C^2}$$

mit

n	Notwendige Anzahl an Simulationsdurchläufen
$t(\alpha, n-1)$	Wert aus der Student-t-Verteilung iterativ gemäß eines anfänglichen Schätzwertes für n
s	Standardabweichung der untersuchten Kenngröße
C	Gewünschtes Konfidenzintervall

Das initiale Konfidenzintervall kann über den Standardfehler SE (siehe u. a. SACHS [2006]) berechnet werden. Damit werden Eigenschaften der angenommenen Normalverteilung ausgenutzt. Eine Abschätzung für das zweiseitige Konfidenzintervall ergibt sich daraus zu:

$$2 * 1,96 * SE \quad \text{mit} \quad SE = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Ein zweiseitiges Konfidenzintervall wird deshalb verwendet, weil Abweichungen vom Mittelwert in beide Richtungen (positiv und negativ) möglich sind. Gemäß FGSV [2006] wird die einseitige absolute Länge des Konfidenzintervalls KI als Maß für die Signifikanz zweier Simulationsergebnisse berechnet. Das Konfidenzintervall beschreibt den Wertebereich, in dem der Mittelwert der Grundgesamtheit mit der Wahrscheinlichkeit des Konfidenzniveaus liegt. Das Konfidenzniveau wird zu 95 % festgelegt.

Tabelle 4-1: Berechnung der notwendigen Anzahl an Simulationsdurchläufen für die Baustellenwarnung für das Beispiel dichter Verkehr und 50 % Ausstattungsrate

Kenngröße	Mittelwert	Standardabweichung	KI berechnet aus initialen Durchläufen mit Standardfehler	erreichbares KI	Anzahl notwendiger Simulationen
$V_{\text{mittel_Fzg}}$ [km/h]	121,46	6,88	13,13	5,43	5
th_{mittel} [s]	2,54	0,08	0,15	0,05	5
$V_{\text{mittel_QS}}$ [km/h]	67,79	12,80	24,40	10,10	5

Tabelle 4-1 zeigt exemplarisch die Berechnung der notwendigen Anzahl an Simulationsdurchläufen für die Untersuchung der Baustellenwarnung und für eine 50 %-ige Ausstattungsrate und die Kenngrößen: mittlere Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten $V_{\text{mittel_Fzg}}$, mittlere Nettozeitlücke th_{mittel} sowie mittlere Geschwindigkeit der Fahrzeuge an einem ausgewählten Messquerschnitt $V_{\text{mittel_QS}}$. Als Querschnitt wird derjenige mit der maximalen Varianz ausgewählt, da auch dort das berechnete Konfidenzintervall maximal wird und damit auch die Anzahl notwendiger Simulationsdurchläufe. Die Berechnungen zu den einzelnen Kenngrößen aller Untersuchungsszenarien für die Baustellenwarnung sind dem Anhang zu entnehmen (vgl. auch BAUR & HOFFMANN [2013]). Die Berechnung für die Untersuchung der Stauendwarnung erfolgt analog. Zusammenfassend ergibt sich, dass jeweils 5 Simulationsdurchläufe notwendig sind, um die gewählte statistische Sicherheit zu erreichen und repräsentative Aussagen zu erzielen.

4.2 Validierung der Verkehrssimulation

Die Kalibrierung und die Validierung der Verkehrssimulation sind für die Zuverlässigkeit und Repräsentativität der simulationsbasierten Wirkungsabschätzung wesentlich. Die Begriffe Kalibrierung und Validierung werden gemäß FGSV [2006] wie folgt verwendet:

„Unter Kalibrierung wird das Einstellen der Modellparameter verstanden. Im Idealfall lässt sich ein Parameter direkt messen; dies ist oft nicht möglich, daher muss meist der Parametersatz des Simulationsmodells geschätzt werden. Dies bedeutet, dass die Modellparameter geändert werden, bis die Abweichung zwischen Modell und Realität minimal ist. Dieser Prozess kann manuell oder algorithmisch-numerisch erfolgen.“

Als Validierung bezeichnet man den Nachweis, dass mit dem kalibrierten Modell ein empirischer Datensatz unter Einhaltung eines definierten Fehlers nachgebildet werden kann. Dabei muss mindestens ein Datensatz verwendet werden, der nicht für die Kalibrierung des Modells genutzt wurde.“ [FGSV, 2006]

Für den Fall, dass nur ein empirischer Datensatz vorliegt, so kann gemäß FGSV [2006] zunächst geprüft werden, ob unter Nutzung des Standard-Parametersatzes valide Ergebnisse auch ohne den Schritt der Kalibrierung erzielt werden können. Es kann also auf die Kalibrie-

rung verzichtet werden, wenn für eine Kenngröße das zuvor festgelegte Fehlermaß auch ohne Anpassung von Parametern eingehalten wird.

Je nach Fragestellung sollten die zur Validierung herangezogenen Kenngrößen repräsentativ für die Untersuchungsziele sein. Die Validierung der Verkehrssimulation kann neben einer visuellen Validierung, z. B. über den grafischen Vergleich verschiedener Kenngrößen, die Berechnung verschiedener Fehlermaße, wie z. B. Fehlerquadrate, mittlere Fehler oder Regressionsanalysen, beinhalten (vgl. u. a. [FHWA, 2004], [FGSV, 2006]).

4.2.1 Visuelle Validierung

Die visuelle Überprüfung schon während der Simulationsläufe gibt einen ersten Einblick in die Qualität der Modellierung: Sieht das Fahrerverhalten plausibel aus? Reagieren die Fahrzeuge in der Simulation so, wie mit der Modellierung beabsichtigt? Zusätzlich geben aber auch die graphische Darstellung bestimmter Kenngrößen und der Vergleich mit den Basisdaten gute Aufschlüsse über die Qualität der umgesetzten Modellierung. Für diesen Vergleich werden die Kenngrößen: mittlere Geschwindigkeit, Nettozeitlücke und Time-To-Collision für die Untersuchung des freien Verkehrszustands aus der Fahrsimulation und der Verkehrssimulation verwendet.

Die Geschwindigkeitsreduktion im Vorfeld vor der sicherheitskritischen Situation muss realistisch abgebildet werden. Im Bild 4-2 sind die Verläufe der mittleren Geschwindigkeiten über den Ort für jeweils Fahrzeuge mit Baustellenwarnung und ohne Baustellenwarnung für den Vergleich der Basisdaten aus der Fahrsimulation mit den Ergebnissen aus der Verkehrssimulation dargestellt.

In den exemplarischen Vergleichen für die Baustellenwarnung stammen die Daten aus der Verkehrssimulation aus dem Szenario mit einer 50%igen Ausstattungsrate mit FAS. Es sind Mittelwerte über alle Simulationsdurchläufe und beziehen sich auf mehrere 1000 Fahrer. Die Daten aus der Fahrsimulation sind ebenso Mittelwerte über alle 20 Fahrer.

Als Stellgrößen werden den Fahrzeugen in die Verkehrssimulation an bestimmten Orten bzw. zu bestimmten Zeiten neue Wunschgeschwindigkeiten zugewiesen. Es wird geprüft, ob diese punktuelle Zuweisung einer neuen Geschwindigkeit zu einem ähnlichen Verlauf der Geschwindigkeit über den Ort führt, wie dies in den Basisdaten aus der Fahrsimulation beobachtet wurde.

Die verschiedenen Verläufe liegen beieinander und zeigen damit die tendenzielle Übereinstimmung zwischen den Geschwindigkeitsverläufen aus der Verkehrssimulation und aus den Basisdaten der Fahrsimulation. Trotz der punktuellen Manipulation der Wunschgeschwindigkeiten kann das Verhalten über den Ort ähnlich nachgebildet werden. Der frühere Reaktionsbeginn der Fahrzeuge mit FAS sowie die Veränderung der Geschwindigkeit über den Ort werden in der Verkehrssimulation gemäß der Eingangsdaten aus Fahrsimulation abgebildet.

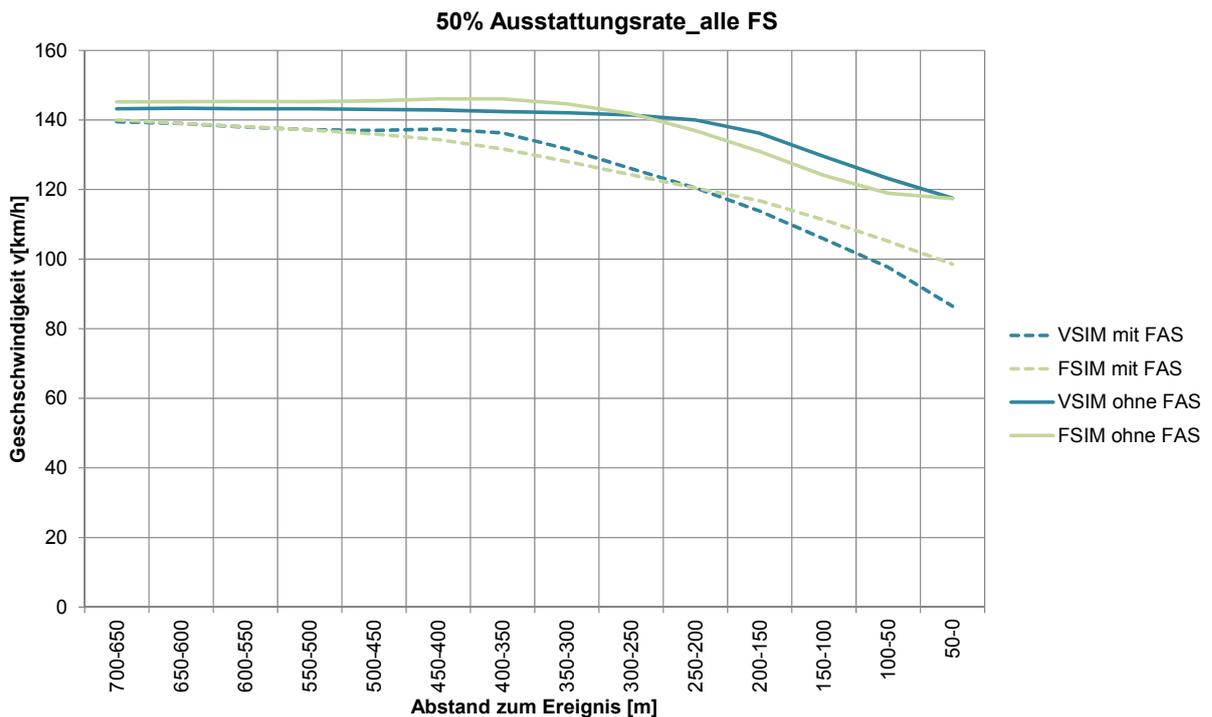


Bild 4-2: Verlauf der mittleren Geschwindigkeiten aller Pkw mit FAS und ohne FAS im Vorfeld der Baustelle im Vergleich zwischen den Basisdaten aus der Fahrsimulation und den Ergebnissen aus der Verkehrssimulation über alle Fahrstreifen

Die Fahrzeuge ohne FAS reagieren in der Verkehrssimulation allerdings etwas später als in der Fahrsimulation beobachtet. Geht man davon aus, dass die Basisdaten trotz der geringen Stichprobe ein repräsentatives Fahrerverhalten zeigen, sollte der Reaktionsbeginn in der Verkehrssimulation für aufbauende Untersuchungen angepasst und früher gesetzt werden.

Die Kurven liegen nicht ideal aufeinander. Ein Grund für diese Verschiebung könnte in der unterschiedlichen Verteilung der Fahrstreifennutzung liegen. In der Fahrsimulation wird überwiegend der schnellere linke Fahrstreifen genutzt, in der Verkehrssimulation ist die Fahrstreifennutzung gleichverteilt. Dies beeinflusst die Mittelwertbildung der Geschwindigkeit über den Ort. Ein weiterer Grund kann die unterschiedliche Stichprobengröße sein. Die Daten aus der Fahrsimulation beziehen sich auf 20 Fahrer, die Daten aus der Verkehrssimulation auf mehrere 1000 Fahrzeuge. Ein weiterer Grund kann die Beeinflussung durch den umgebenden Verkehr sein, die verkehrlichen Randbedingungen sind in Verkehrssimulation und Fahrsimulation zwar ähnlich, aber nicht identisch. Eine identische Abbildung der Verkehrszustände (mittlere Geschwindigkeiten und Abstandsverhalten) ist aufgrund der unterschiedlichen Betrachtungsweisen der Fahrsimulation und der Verkehrssimulation nicht ohne große Aufwände möglich. Die Geschwindigkeitsverläufe werden auch durch die Fahrerreaktionen der folgenden Fahrer beeinflusst. Die vorhandenen Eingangsdaten beinhalten nicht, wie ein Fahrer ohne FAS reagiert, wenn das vorfahrende Fahrzeug aus einem ihm unersichtlichen Grund bremst. Ob dieses evtl. geänderte Verhalten realistisch in der Verkehrssimulation abgebildet wird, wurde in dieser Arbeit nicht untersucht, sollte aber Gegenstand weiterer Forschung sein.

Auch das Abstandsverhalten wird auf realistische Nachbildung überprüft. Nachfolgend werden exemplarisch die Ergebnisse für das Beispiel Baustellenwarnung vorgestellt. Es werden dafür die Verteilungen der Nettozeitlücken und der Time-To-Collision-Werte (TTC) aus den Basisdaten der Fahrsimulation mit den Ergebnissen aus der Verkehrssimulation für den freien Verkehrszustand verglichen. Es werden relative Häufigkeiten verschiedener Klassen von Nettozeitlücken und TTC gegenübergestellt.

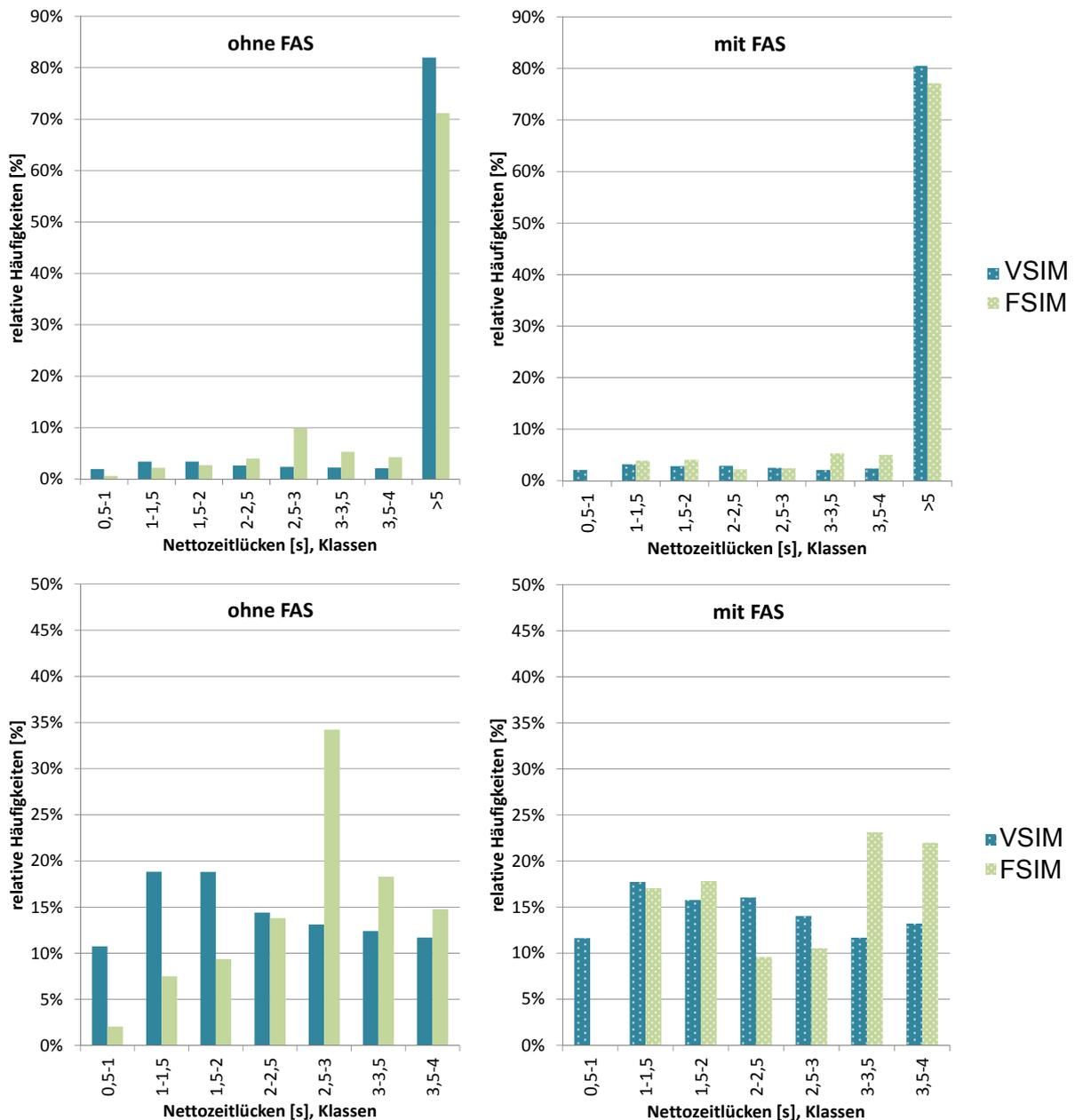


Bild 4-3: Relative Häufigkeiten verschiedener Klassen von Nettozeitlücken ohne und mit FAS im Vergleich zwischen den Basisdaten aus der Fahrsimulation (hell) und den Ergebnissen aus der Verkehrssimulation (dunkel) über alle Fahrstreifen; für alle Nettozeitlücken (oben) und für THW < 5 Sekunden (unten)

Bild 4-3 zeigt die relativen Häufigkeiten von Nettozeitlücken verschiedener Kritikalitätsklassen in Intervallen von 0,5 s im Vergleich zwischen den Basisdaten aus der Fahrsimulation und den Ergebnissen aus der Verkehrssimulation über alle Fahrstreifen jeweils für alle Fahrer mit FAS bzw. ohne FAS.

Die Verteilungen zeigen für den Fall mit FAS eine bessere Übereinstimmung der simulierten Werte im Vergleich zu den Basisdaten als für den Fall ohne FAS. Für den Fall ohne FAS zeigt sich in der Fahrsimulation ein großer Anteil an Nettozeitlücken zwischen 2,5 und 3 Sekunden. Dies wird in der Verkehrssimulation so nicht nachgebildet. Im Bereich sehr geringer Nettozeitlücken sind die relativen Häufigkeiten in der Verkehrssimulation höher als in der Fahrsimulation.

Die Tendenz zu häufig kleineren Nettozeitlücken in der Verkehrssimulation kann u. a. an einem nicht ganz vergleichbaren Verkehrszustand liegen. Ein weiterer Grund kann die Art der Nettozeitlückenmessung während der Fahrstreifenwechsel in der Verkehrssimulation sein. In der Verkehrssimulation werden teilweise während eines Fahrstreifenwechsels Nettozeitlücken von 0 Sekunden angegeben, auch wenn sich die Fahrzeuge bereits auf verschiedenen Fahrstreifen befinden und keine Kollision stattfindet. Nettozeitlücken von 0 Sekunden in der Verkehrssimulation wurden daher in diesem Vergleich nicht berücksichtigt. Die geringen Nettozeitlücken müssen daher aber mit Vorsicht betrachtet werden. Auch die Nettozeitlücken werden durch die Fahrerreaktionen der folgenden Fahrer beeinflusst. Die Eingangsdaten zeigen nicht, wie ein Fahrer ohne FAS reagiert, wenn das vorfahrende Fahrzeug aus einem ihm unersichtlichen Grund bremst. Starke, plötzliche Bremsungen des Vorderfahrzeugs führen in der Verkehrssimulation zu kurzen Nettozeitlücken, die die obigen Verläufe beeinflussen. Ob dieses evtl. geänderte Verhalten bei der Reaktion auf das Vorderfahrzeug realistisch in der Verkehrssimulation abgebildet wird, wurde in dieser Arbeit nicht untersucht, sollte aber Gegenstand weiterer Forschung sein. Auch die Abbildung des Verkehrszustands beeinflusst das Abstandsverhalten stark. Die Verkehrszustände in der Fahrsimulation und in der Verkehrssimulation sind ähnlich, aber nicht identisch. Eine identische Abbildung der Verkehrszustände ist aufgrund der unterschiedlichen Betrachtungsweisen der Fahrsimulation und der Verkehrssimulation nicht ohne große Aufwände möglich. Die Fahrsimulation setzt den Verkehrszustand immer in Bezug zu dem Versuchsfahrer, während in der Verkehrssimulation immer alle Fahrer im Untersuchungsnetz betrachtet werden.

Der eindeutige Vergleich der Daten aus der Verkehrssimulation und der Fahrsimulation ist nicht möglich, obige Darstellung kann lediglich die Tendenzen wiedergeben und qualitative Aussagen ermöglichen.

Bild 4-4 zeigt die relativen Häufigkeiten verschiedener Kritikalitätsklassen von Time-To-Collision (TTC) im Vergleich zwischen der Fahrsimulation und den Ergebnissen aus der Verkehrssimulation über alle Fahrstreifen, jeweils für alle Fahrer mit FAS bzw. ohne FAS. Die Verteilungen zeigen eine tendenzielle Übereinstimmung der simulierten Werte im Vergleich zu den Basisdaten. Die Unterschiede zwischen den Werten mit und ohne FAS können nach-

gebildet werden. Sowohl in den Basisdaten der Fahrsimulation als auch in den Ergebnissen der Verkehrssimulation ist eine starke Verschiebung der TTC in den nicht kritischen Bereich zu erkennen. TTC im niedrigen Sekundenbereich kommen sowohl in der Fahrsimulation als auch in der Verkehrssimulation mit FAS sehr viel weniger häufig vor. Der eindeutige Vergleich der Daten aus der Verkehrssimulation und der Fahrsimulation ist allerdings u. a. wegen der Daten während der Fahrstreifenwechsel in der Verkehrssimulation oder der nicht untersuchten und modellierten Reaktion auf das ggf. stark bremsende Vorderfahrzeug auch hier nicht möglich. Der Vergleich kann lediglich die Tendenzen wiedergeben und qualitative Aussagen ermöglichen.

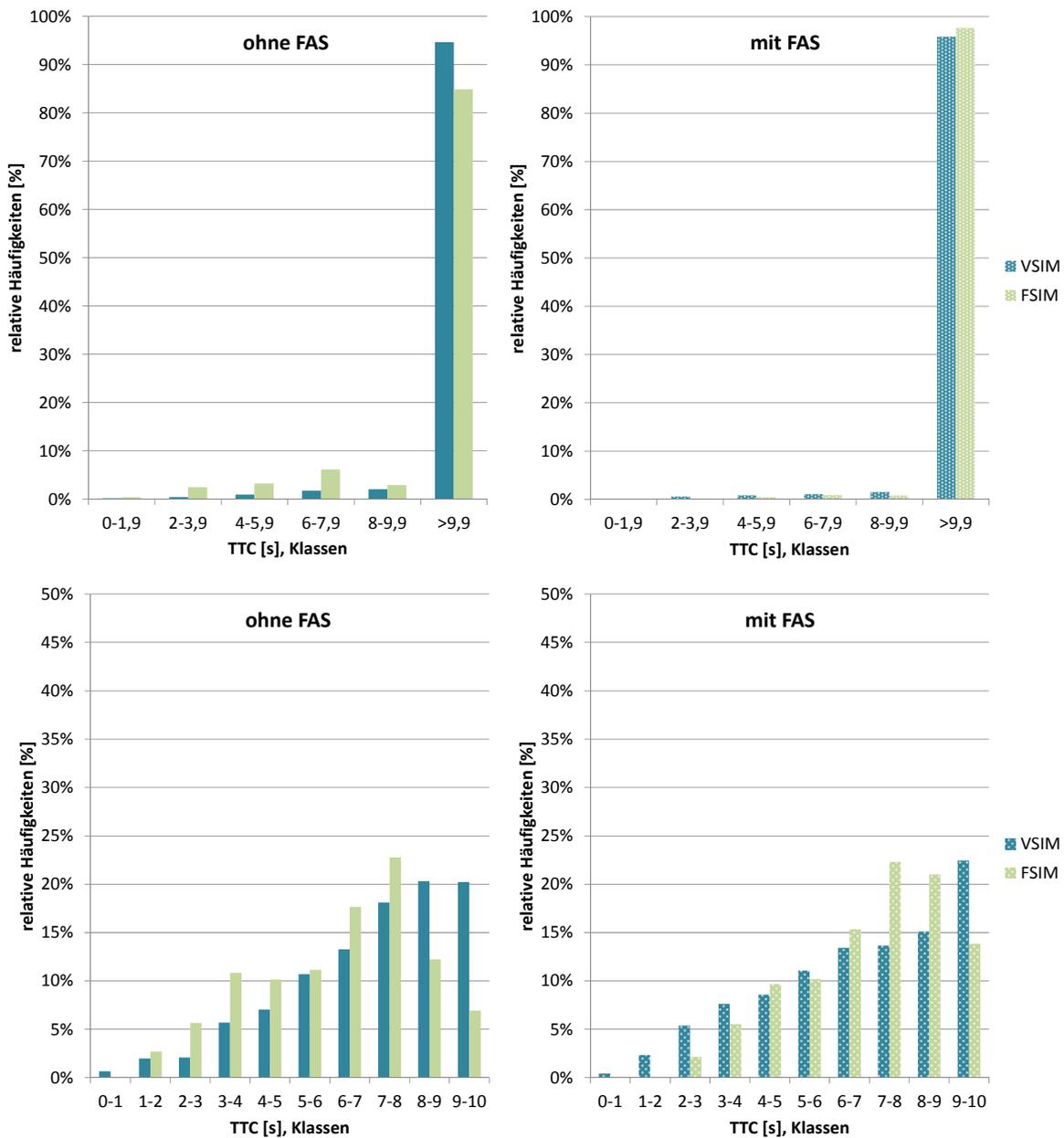


Bild 4-4: relative Häufigkeiten verschiedener Klassen von Time-To-Collision ohne und mit FAS im Vergleich zwischen den Basisdaten aus der Fahrsimulation (hell) und den Ergebnissen aus der Verkehrssimulation (dunkel) über alle Fahrstreifen, für alle TTC (oben) und für TTC < 10 Sekunden (unten)

4.2.2 Fehlerquadrate und mittlerer Fehler

Die Berechnung der Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler RMSE (= Root Mean Square Error) ist ein Fehlermaß zur Ermittlung der Güte der Modellergebnisse x_n^{sim} verglichen mit den Basisdaten x_n^{obs} an einem bestimmten Punkt n. Bei diesem Fehlermaß fallen größere Abweichungen stärker ins Gewicht [vgl. z. B. FGSV, 2006]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n^{sim} - x_n^{obs})^2}$$

Für die Betrachtung der Abweichung in Relation zum Mittelwert wird der prozentuale mittlere quadratische Fehler berechnet RMSPE (= Root Mean Square Percentage Error):

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{x_n^{sim} - x_n^{obs}}{x_n^{obs}} \right)^2}$$

Um ein systematisches Über- oder Unterschreiten der Modellergebnisse - verglichen mit den Basisdaten - zu erkennen, eignen sich die Berechnung des mittleren Fehlers ME (= Mean Error) und des mittleren prozentualen Fehlers MPE (= Mean Percentage Error):

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n^{sim} - x_n^{obs}) \quad \text{und} \quad MPE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{x_n^{sim} - x_n^{obs}}{x_n^{obs}} \right)$$

Die oben beschriebenen Fehlermaße zeigen beim Vergleich der modellierten und Basiswerte der mittleren Geschwindigkeitsverläufe über den Ort (für den Verlauf siehe auch Bild 4-2) eine gute Übereinstimmung; der Fehler ist in allen Fällen kleiner als 5 % (vgl. Tabelle 4-2). Im Mittel werden die Geschwindigkeiten gut abgebildet. Allerdings gleichen sich bei dieser Betrachtung die Über- und Unterschreitungen zwischen den Geschwindigkeiten gegenseitig aus:

Tabelle 4-2: Fehlerquadrate und mittlere Fehler beim Vergleich der Geschwindigkeitsverläufe ohne und mit FAS

Geschwindigkeitsverlauf	[-]	ohne FAS	mit FAS
RMSE	km/h	3,1	4,7
RMSPE		2 %	4 %
ME	km/h	-0,2	-1,4
MPE		0 %	-2 %

Die Verkehrsnachfrage für die Untersuchungssituation liegt kalibriert und validiert vor (vgl. BAUR & HOFFMANN [2013]). Die Verkehrsnachfrage im Bereich des Untersuchungsnetzes resultiert aus den Fahrzeugzuflüssen an den Rändern des Netzes, den gefahrenen Routen

der Fahrzeuge, den mittleren Geschwindigkeiten der Fahrzeuge sowie dem Anteil von Schwerverkehrsfahrzeugen (Fahrzeuge > 12 t Gesamtgewicht).

Im Simulationsnetz befinden sich Messquerschnitte an den gleichen Stellen wie im realen Netz. Die simulierten Verkehrsstärken werden mit den Realdaten verglichen und kalibriert. Nach ausreichender Kalibrierung wird die simulierte Verkehrsnachfrage mit den Daten einer weiteren vergleichbaren realgemessenen Verkehrsnachfrage für das Nullfall-Szenario validiert. Nachfolgendes Bild 4-5 zeigt ein exemplarisches, repräsentatives Beispiel für die Validierung der Verkehrsnachfrage. Der mittlere quadratische Fehler beträgt 10,7 Fz/15min, was einem prozentualen, mittleren quadratischen Fehler von 1,59 % entspricht. Dies bedeutet eine sehr gute Übereinstimmung von realen und simulierten Werten. Die Validierung erfolgt ebenso für alle Querschnitte. Detaillierte Informationen finden sich unter BAUR & HOFFMANN [2013]. Die weiteren Untersuchungen werden an einer Verkehrssimulation mit einer für den Nullfall, für eine 0%ige Ausstattungsrate mit FAS, validen Verkehrsnachfrage durchgeführt.

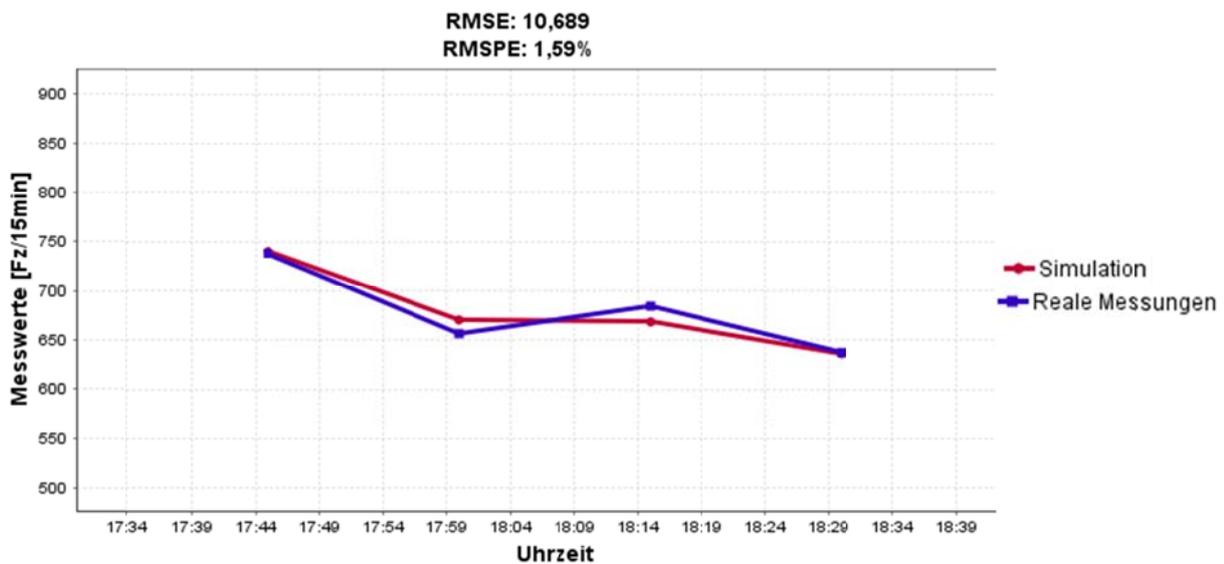


Bild 4-5: Exemplarisches Beispiel für die Validierung der Verkehrsnachfrage für das untersuchte Szenario - Vergleich der gemessenen Verkehrsstärke in der Verkehrssimulation mit realen Messwerten an einem exemplarischen Querschnitt, Verkehrszustand „dicht“, vgl. BAUR & HOFFMANN [2013]

4.2.3 Regressionsanalyse

Mit der Korrelations- und Regressionsanalyse werden Zusammenhänge zwischen zwei metrischen Variablen analysiert [vgl. z. B. FGSV, 2006]:

Der Korrelationskoeffizient $r_{x_{sim}x_{obs}}$ beschreibt die Stärke des Zusammenhangs zwischen den simulierten Werten X_{sim} und den beobachteten Basisdaten X_{obs} :

$$r_{x_{sim}x_{obs}} = \frac{Kov(X_{sim}, X_{obs})}{s_{sim} \cdot s_{obs}}$$

Mit:

s_{sim}	Standardabweichung der simulierten Werte
s_{obs}	Standardabweichung der beobachteten Werte
$Kov(X_{sim}, X_{obs})$	Kovarianz

Das Bestimmtheitsmaß R^2 ist ein Maß für die Güte der Anpassung der Simulationswerte durch die Regressionsgleichung:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_{i,sim} - \bar{x}_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{i,sim} - \bar{x}_{sim})^2}$$

Mit:

$\hat{y}_{i,sim}$	geschätzte Regresswerte i durch das Regressionsmodell
$y_{i,sim}$	simulierte Werte i
\bar{x}_{sim}	Mittelwerte der Simulationsergebnisse

Der Wertebereich für R^2 liegt zwischen $0 < B < 1$, wobei ein hoher Wert eine gute Anpassung anzeigt.

Es wird eine Regressionsanalyse für die Verläufe der Geschwindigkeiten durchgeführt (vgl. auch Bild 4-2).

Im Fall „ohne FAS“ ergibt sich der Korrelationskoeffizient $r_{x_{sim}x_{obs}} = 0,9755$. Das Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt 0,9517. Für die Regressionsanalyse im Fall mit FAS ergibt sich der Korrelationskoeffizient $r_{x_{sim}x_{obs}} = 0,9895$. Das Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt 0,9791. Diese Werte zeigen eine prinzipielle Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen aus der Verkehrssimulation und den Basisdaten aus der Fahrsimulation für die angegebene Geradengleichung y, siehe Bild 4-6.

Allerdings zeigt sich durch die Regressionsanalyse auch die Verschiebung der Geschwindigkeitsverläufe, die ebenfalls in Bild 4-2 sichtbar ist. Für den Verlauf der Geschwindigkeit werden die Werte ohne FAS in der Verkehrssimulation tendenziell niedriger abgebildet. Für die Fahrer mit FAS sind die Werte in der Verkehrssimulation tendenziell höher.

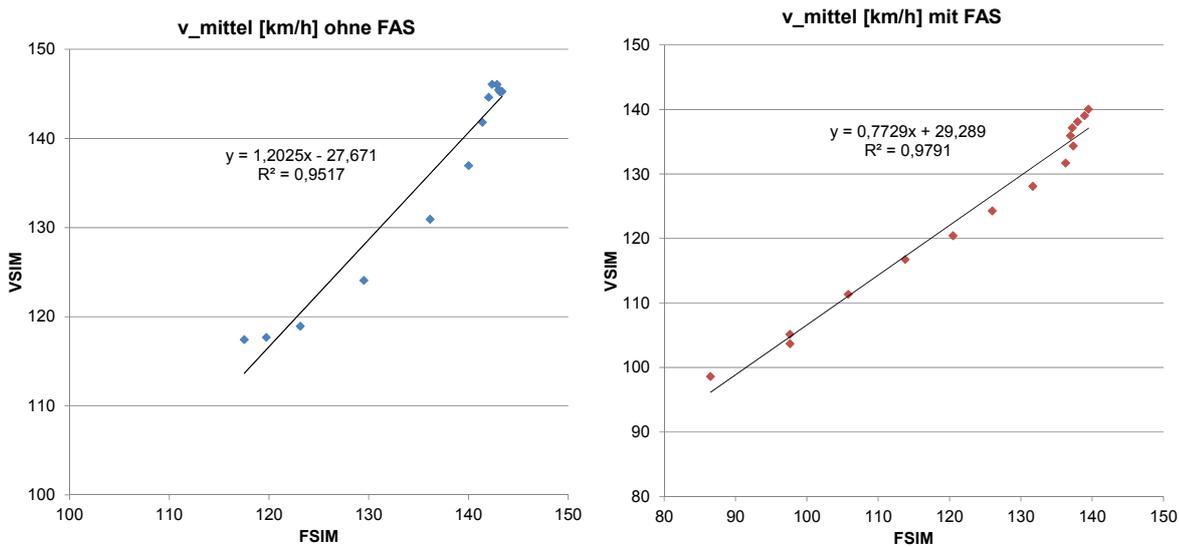


Bild 4-6: Ergebnisse der Regressionsanalyse für den Vergleich der mittleren Geschwindigkeiten ohne FAS (links) mit FAS (rechts) und in der Verkehrssimulation (VSIM = Ordinate) und in der Fahrsimulation (FSIM = Abszisse)

4.2.4 Zusammenfassende Validierung

In diesem Abschnitt wurde ein prinzipielles Vorgehen für die Validierung mikroskopischer Daten vorgestellt und exemplarisch für das Untersuchungsbeispiel Baustellenwarnung durchgeführt. Dabei zeigt sich eine mäßige Übereinstimmung der gewählten Kenngrößen im Vergleich der Ergebnisse der Verkehrssimulation mit den Eingangsdaten aus der Fahrsimulation. Wird davon ausgegangen, dass die Eingangsdaten die Realität repräsentieren und dass die Daten aus vergleichbaren Situationen stammen, so sollte die Modellierung insbesondere des Abstandsverhaltens angepasst werden.

Das Geschwindigkeits- und das Abstandsverhalten, in Form von Nettozeitlücken und TTC, wird tendenziell so nachgebildet, wie in den Basisdaten beobachtet. Trotz der punktuellen Manipulation der Wunschgeschwindigkeiten kann das Verhalten über den Ort ähnlich nachgebildet werden. Allerdings zeigen sich systematische Schwächen beim Vergleich dieser Kenngrößen. Diese können teilweise an nicht identischen Verkehrszuständen in Verkehrssimulation und Fahrsimulation liegen, die das Geschwindigkeits- und Abstandsverhalten sehr stark beeinflussen. Der eindeutige Vergleich dieser Daten aus der Verkehrssimulation und der Fahrsimulation ist daher nicht möglich. Auch zeigt sich eine Unstetigkeit beim Verlauf der Nettozeitlücken in der Fahrsimulation, die durch die geringe Stichprobengröße begründet sein kann. Der empirische Datensatz ist zu gering für eine detaillierte Validierung.

Unter den gegebenen Randbedingungen sind evtl. die verwendeten Kenngrößen für die Validierung nicht geeignet, da diese stark durch die verkehrliche Situation beeinflusst werden. Es werden weitere Untersuchungen zu diesem Themenbereich empfohlen.

Die Validierung der Nachbildung der Verkehrsnachfrage des untersuchten Straßennetzes im Vergleich mit einem realen Autobahnabschnitt zeigt eine sehr gute Übereinstimmung.

Da es bei der vorliegenden Arbeit um die Prüfung der prinzipiellen Machbarkeit des vorgeschlagenen Vorgehens geht, wird das vorhandene Modell trotz seiner bekannten Unstimmigkeiten und der geringen Datenbasis weiterverwendet. Für weiterführende Untersuchungen, mit dem Ziel allgemeingültige Aussagen zum Fahrerverhalten zu treffen, wird allerdings empfohlen, Eingangsdaten zu verwenden, die entsprechend der Untersuchungsziele der Verkehrssimulation aufgezeichnet werden. Ein Schwerpunkt sollte dann auf der Schaffung identischer verkehrlicher Randbedingungen liegen. Auch die Betrachtung weiterer Fahrerreaktionen, wie z. B. der indirekten Reaktion auf ein gewarntes Fahrzeug sollten gezielt untersucht werden, um Eingangsdaten für die Modellierung zu erhalten.

4.3 Wirkungsanalyse und Bewertung hinsichtlich Verkehrssicherheit

Im Folgenden wird eine exemplarische Wirkungsermittlung für die in Abschnitt 2.3.3 definierte Kenngrößen durchgeführt. Geschwindigkeit, Beschleunigung und Abstandsverhalten werden für die Variation der Ausstattungsraten und deren Einfluss auf das Fahrzeugkollektiv auf statistisch signifikante Unterschiede untersucht. Die Ergebnisse werden hinsichtlich der Wirkung auf die Verkehrssicherheit interpretiert und bewertet. Abschließend wird das vorgestellte Vorgehen in Bezug auf Praktikabilität und Aussagekraft der Ergebnisse überprüft und hinterfragt.

4.3.1 Geschwindigkeitsbezogene Kenngrößen

Bild 4-7 zeigt den Verlauf der mittleren Geschwindigkeiten aller Fahrzeuge über den Ort im Vergleich unterschiedlicher Ausstattungsraten mit FAS von 0, 20, 50 und 80 % für die Baustellenwarnung. Mit zunehmendem Ausstattungsgrad und damit verbesserter Information über die Baustelle, werden die mittleren Geschwindigkeiten über den Ort geringer.

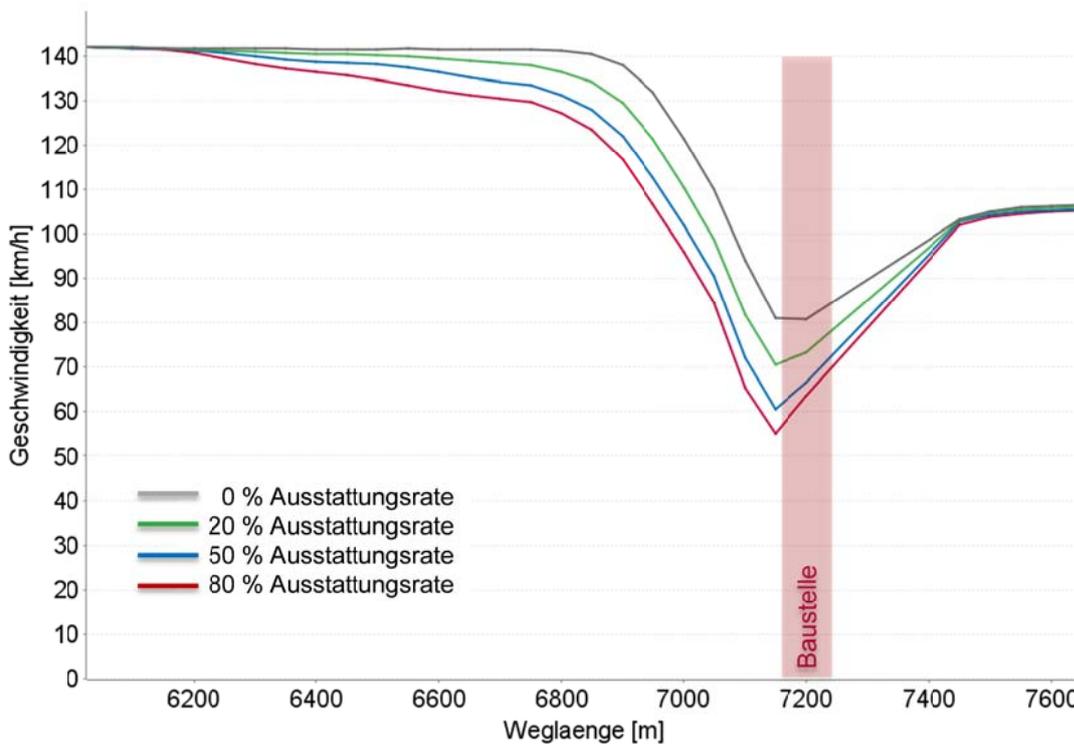


Bild 4-7: Verlauf der Geschwindigkeit über den Ort für die Baustellenwarnung für die Variation der Ausstattungsraten mit FAS von 0, 20, 50 und 80 %

Es zeigt sich, wie durch die Information oder Warnung und das dadurch geänderte Fahrerverhalten mit zunehmender Ausstattungsrate früher und stärker auf die kritische Situation durch Reduktion der Geschwindigkeit reagiert wird.

Ein ähnliches Ergebnis zeigt sich für das Beispiel Stauendwarnung, siehe Bild 4-8. Die Fahrer reagieren mit steigender Ausstattungsrate früher und mit geringeren Geschwindigkeiten

auf die Situation und beeinflussen somit den gesamten Verkehr positiv. Durch das mit der Zeit wandernde Stauende sind die Effekte in der räumlichen Darstellung etwas relativiert.

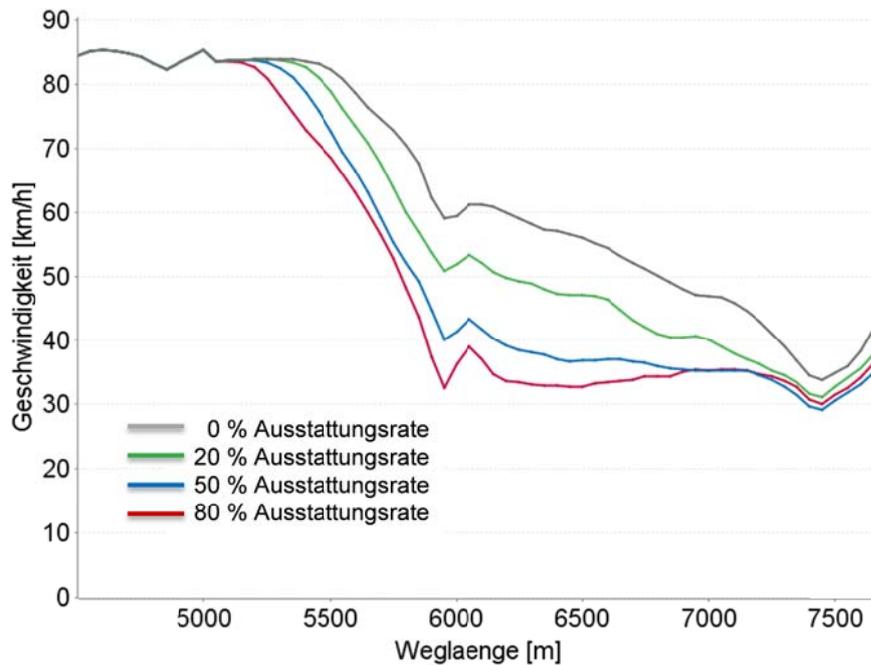


Bild 4-8: Verlauf der Geschwindigkeit über den Ort für die Stauendwarnung für die Variation der Ausstattungsrate mit FAS von 0, 20, 50 und 80 %

Bild 4-9 zeigt Boxplots für die mittleren Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten für die Baustellenwarnung und die Stauendwarnung im Vergleich zwischen unterschiedlichen Ausstattungsrate mit FAS von 0, 20, 50 und 80 % für alle Fahrzeuge.

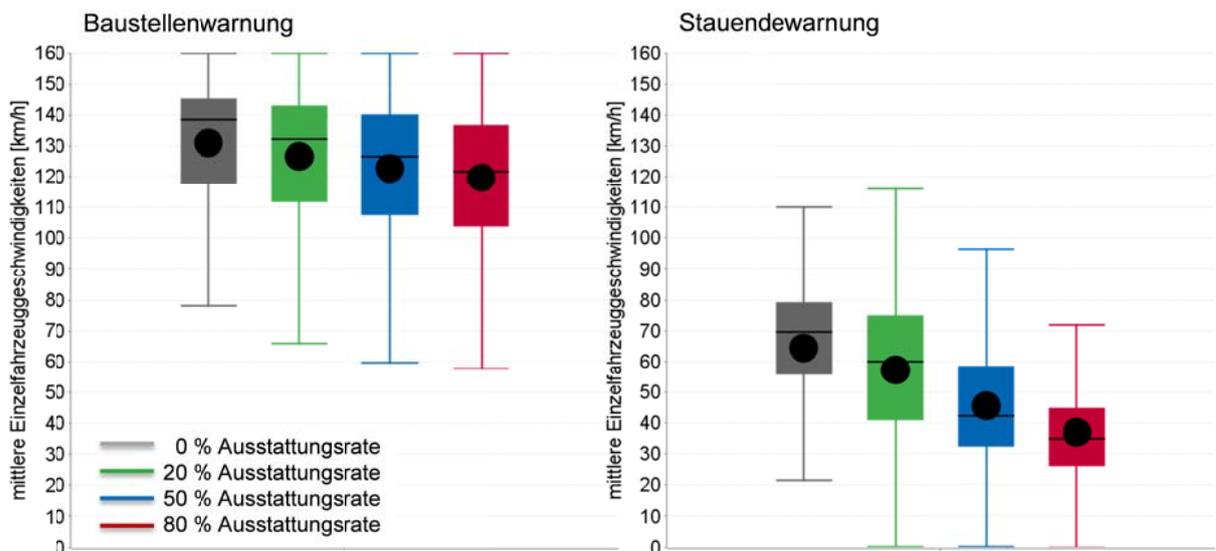


Bild 4-9: Vergleich der Verteilungen der mittleren Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten für die Baustellenwarnung (links) und für die Stauendwarnung (rechts) für die Variation der Ausstattungsrate mit FAS von 0, 20, 50 und 80 %

Die mittleren Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten werden bei beiden Beispielen bei Ausstattungsraten von 20, 50 und 80 % niedriger, verglichen mit einer Ausstattungsrate von 0 %. Für den Fall, dass 80 % der Fahrzeuge mit dem System ausgestattet sind, werden die mittleren Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten am niedrigsten, sie reduzieren sich um bis zu 8,6 % für die Baustellenwarnung, verglichen mit dem Nullfall. Bei der Stauendwarnung reduzieren sich die mittleren Geschwindigkeiten mit steigendem Ausstattungsgrad noch stärker, um bis zu 43 % für die 80%ige Ausstattung verglichen mit dem Nullfall. Die Ergebnisse zwischen den verschiedenen Ausstattungsraten unterscheiden sich statistisch signifikant in allen möglichen Kombinationen. Tabelle 4-3 zeigt die Ergebnisse für die Baustellenwarnung:

Tabelle 4-3: Baustellenwarnung: mittlere Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten pro Ausstattungsrate, Tests auf Normalverteilung der Daten und Signifikanztests zwischen den Ausstattungsvarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert)

mittlere Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten						Signifikanztest und Differenzen			
Normalverteilungstest			Werte			Ausstattungsrate			
Ausstattungsrate	p-value	normalverteilt?	Anzahl Fahrzeuge	Mittelwert km/h	Std. abw	0 %	20 %	50 %	80 %
0 %	0,16	ja	4083	130,98	20,14	-	d = -4,38 -3,34 % p = 0,000 *	d = -8,26 -6,30 % p = 0,000 *	d = -11,29 -8,62 % p = 0,000 *
20 %	0,11	ja	4084	126,60	20,85			d = -3,87 -3,06 % p = 0,000 *	d = -6,91 -5,46 % p = 0,000 *
50 %	0,09	ja	4090	122,73	21,25				d = -3,04 -2,48 % p = 0,000 *
80 %	0,05	ja	4089	119,69	20,91				-

4.3.2 Beschleunigungsbezogenen Kenngrößen

Neben der Betrachtung der minimalen Längsbeschleunigungen können Expositionsdauer (TED) und -stärke (TID) für Längsbeschleunigungen kleiner einer definierten kritischen Längsbeschleunigung von $a_{x_krit} = a_x < -4,5 \text{ m/s}^2$ Aussagen hinsichtlich der Verkehrssicherheitswirkung ermöglichen.

Die Time-Exposed-Critical-Deceleration (TED) pro Fahrzeug berechnet sich zu:

$$TED = \sum_{i=1}^N \delta_i(t) \cdot \tau_{sc}, \quad \text{mit} \quad \delta_i(t) = \begin{cases} 0 & \text{else} \\ 1 & \forall a_x(t) \leq a_{x_krit} \end{cases}$$

mit τ_{sc} als Simulationsschritt (hier 0,1 Sekunden) und gibt an, wie lang die Fahrzeuge im Mittel kritisch bremsen.

Die Time-Integrated-Critical-Deceleration (TID) pro Fahrzeug berechnet sich zu:

$$TID = \sum_{i=1}^N \int_0^T [a_{x_krit} - a_x(t)] dt, \quad \text{mit} \quad \forall a_x(t) \leq a_{x_krit}$$

und gibt an, wie stark und wie lang die Fahrzeuge im Mittel kritisch bremsen.

Das Verhältnis aus den beiden zuvor genannten Kenngrößen TID/TED [s], also das Verhältnis aus Expositionsstärke zu -dauer pro Fahrzeug zeigt an, ob lange schwach oder kurz stark verzögert wird. Auch die Anteile der Fahrzeuge, die mit Längsbeschleunigungen stärker als $a_{x,krit}$ bremsen, werden untersucht.

Minimale Längsbeschleunigung $a_{x,min}$ = maximale Verzögerung

Bild 4-10 zeigt Boxplots für die minimalen Längsbeschleunigungen für die Baustellenwarnung und die Stauendwarnung im Vergleich zwischen unterschiedlichen Ausstattungsraten mit FAS von 0, 20, 50 und 80 %.

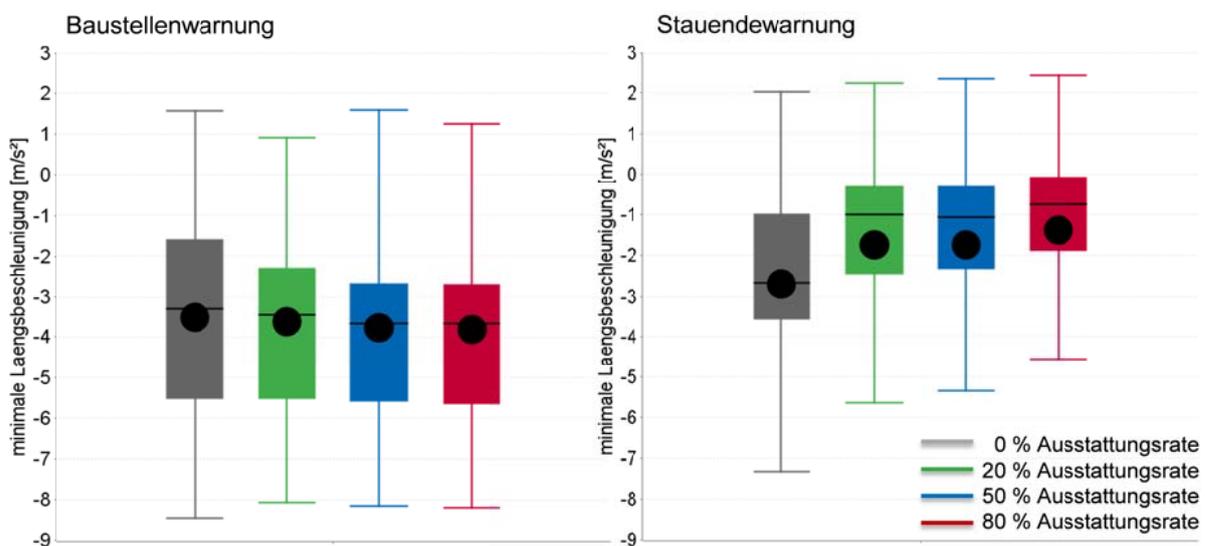


Bild 4-10: Vergleich der Verteilungen der minimalen Längsbeschleunigungen für die Baustellenwarnung (links) und für die Stauendwarnung (rechts) für die Variation der Ausstattungs-raten mit FAS von 0, 20, 50 und 80 %

Bei der Baustellenwarnung werden die minimalen Längsbeschleunigungen bei Ausstattungs-raten von 20, 50 und 80 % tendenziell niedriger. Verglichen mit dem Nullfall, einer Ausstat-tungsrate von 0 %, bremsen die Fahrzeuge im Mittel mit steigendem Ausstattungsgrad stär-ker. Die insgesamt stärksten Bremsungen werden für den Nullfall ermittelt, dort zeigen die Whisker Bremsungen mit einer Verzögerung von mehr als 8 m/s² an. Für die Fälle mit FAS werden diese starken Bremsungen etwas reduziert. Die Streuungen der minimalen Längsbe-schleunigungen werden mit steigender Ausstattungsrate geringer. Aber zwischen 50 und 80%iger Ausstattung mit FAS zeigen sich keine wesentlichen Änderungen der Verteilungen der Längsbeschleunigungen. Die Ergebnisse zwischen den verschiedenen Ausstattungsra-ten unterscheiden sich statistisch signifikant in den meisten Kombinationen, die Unterschiede sind allerdings gering. Zwischen dem Nullfall und dem 20 %-Szenario und zwischen 50 und 80 % sind die Unterschiede nicht signifikant.

Bei der Stauendewarnung werden die minimalen Längsbeschleunigung mit steigenden Ausstattungsrate im Mittel höher, die Fahrzeuge bremsen weniger stark. Zwischen 20 und 50%iger Ausstattung sind keine signifikanten Unterschiede vorhanden. Bei einer 80%igen Ausstattung verbessert sich die mittlere minimale Längsbeschleunigung. Die Fahrzeuge bremsen, im Vergleich mit dem Nullfall, statt mit $2,7 \text{ m/s}^2$ nur noch mit $1,4 \text{ m/s}^2$. Durch das geänderte Fahrerverhalten der Fahrzeuge mit FAS verbessern sich für das gesamte Fahrzeugkollektiv die mittleren minimalen Längsbeschleunigungen. Bei einer 20%igen Ausstattungsrate sind schon Reduktionen der Bremsungen um 35 % vorhanden, verglichen mit dem Nullfall (siehe Tabelle 4-4). Trotz gleicher Verkehrsnachfrage als Eingangsgröße erhöht sich mit steigender Ausstattungsrate die mittlere Anzahl an Fahrzeugen. Grund dafür kann ein reduzierter Stau sein, der die umgesetzte Verkehrsnachfrage in der Verkehrssimulation erhöht, da die Fahrzeuge bei weniger Stau schneller das Netz durchfahren können.

Tabelle 4-4: Stauendewarnung: minimale Längsbeschleunigung pro Ausstattungsrate, Tests auf Normalverteilung der Daten und Signifikanztests zwischen den Ausstattungsratevarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert)

Minimale Längsbeschleunigung							
Werte				Ausstattungsrate			
Ausstattungsrate	Anzahl Fahrzeuge	Mittelwert m/s^2	Std abw	0 %	20 %	50 %	80 %
0 %	2138	-2,70	2,13		d = 0,95 35,04 % p = 0,000 *	d = 0,95 35,22 % p = 0,000 *	d = 1,32 48,78 % p = 0,000 *
20 %	3399	-1,76	2,04			d = 0,00 0,28 % p = 0,880	d = 0,37 21,16 % p = 0,000 *
50 %	3900	-1,75	2,07				d = 0,37 -20,94 % p = 0,000 *
80 %	3138	-1,38	2,08				

Die Untersuchung der Längsbeschleunigung zeigt für die Baustellenwarnung für die Wirkungsanalyse in Bezug auf Verkehrssicherheit keine wesentlichen Erkenntnisse. Die Längsbeschleunigungen werden zwar signifikant kleiner, die Fahrzeuge bremsen im Mittel stärker, die Unterschiede zwischen den Ausstattungsrate sind allerdings recht gering. Eigentlich würde man davon ausgehen, dass ein Fahrerassistenzsystem dazu führt, dass durch die frühere Information weniger stark gebremst werden muss. Stärkeres Bremsen in kritischen Situationen kann aber sogar eine Erhöhung der Verkehrssicherheit bedeuten, da die Fahrzeuge durch die Warnung stärker und evtl. angepasster auf die Situation reagieren. Gerade bei Situationen, die einen Fahrstreifenwechsel nötig machen, kann die stärkere Bremsung sicherer sein. Weitere Erkenntnisse über die Wirkung der Baustellenwarnung können durch die Untersuchung von TED und TID erzielt werden.

Die Betrachtung der Längsbeschleunigung für das Beispiel Stauendewarnung zeigt erwartungsgemäße Ergebnisse. Durch die frühere Warnung passen die Fahrzeuge frühzeitig die

Geschwindigkeit an und bremsen im Mittel weniger stark. Auffällig ist, dass die positive Tendenz zwischen den Ausstattungsraten von 20 % und 50 % stagniert. In diesem Zusammenhang könnte die Untersuchung einer dazwischenliegenden Ausstattungsrate von 30 oder 40 % weitere Erkenntnisse bringen.

Time-Exposed-Critical-Deceleration (TED)

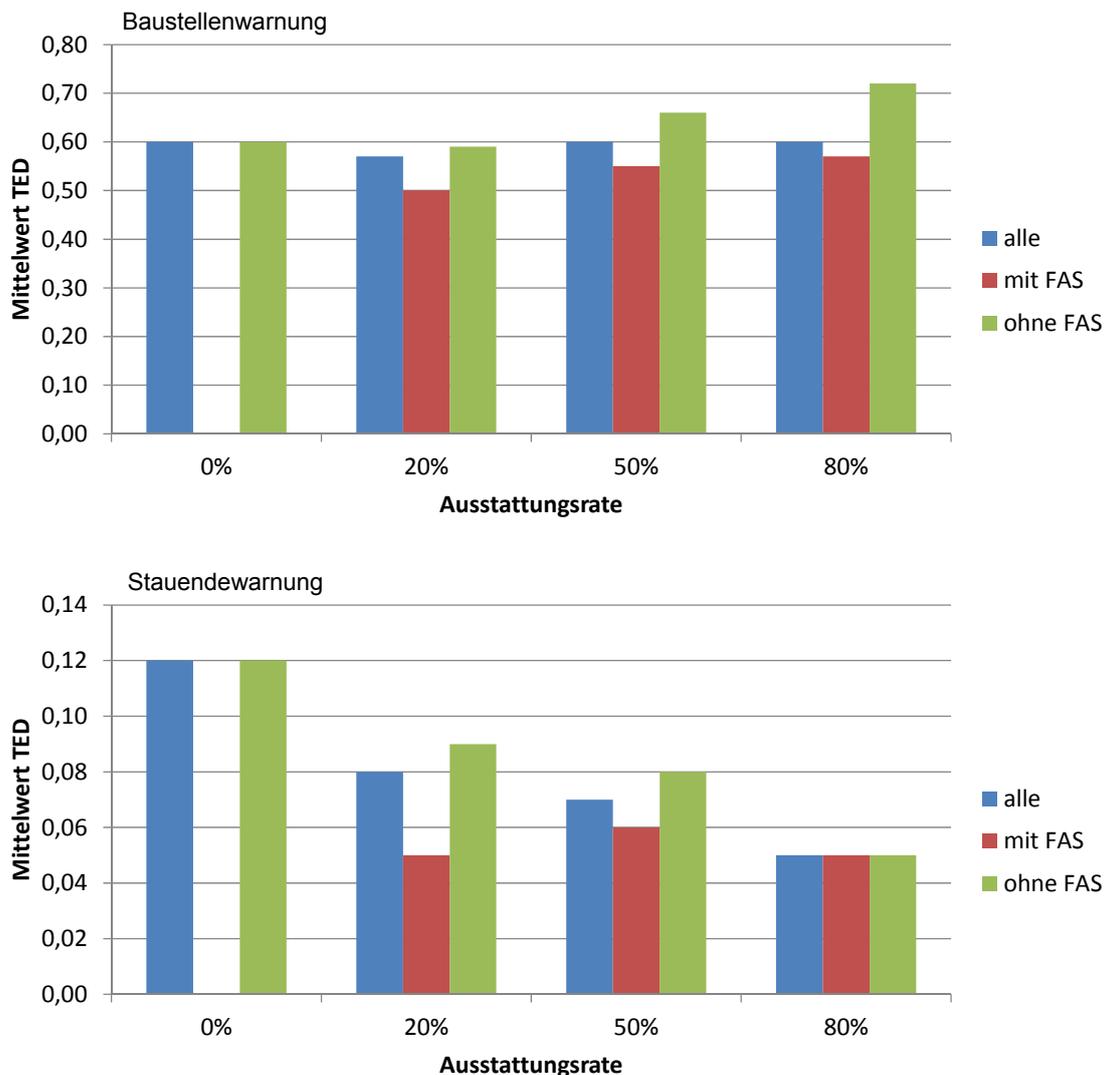


Bild 4-11: Baustellenwarnung (oben) und Stauendwarnung (unten): Mittelwerte der Time-Exposed-Critical-Deceleration (TED) über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsraten, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“

Bild 4-11 zeigt die Mittelwerte der Time-Exposed-Critical-Deceleration (TED) für die Baustellenwarnung und die Stauendwarnung über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsraten, unterteilt nach den Fahrzeuggruppen „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“. Die Fahrzeuge sind im Mittel nur sehr kurz den kritischen Längsbeschleunigungen von $a_x < - 4,5 \text{ m/s}^2$ ausgesetzt, rd. 0,6 Sekunden bei der Baustellenwarnung und 0,12 bis 0,05 Sekunden bei der Stauendwarnung. Die Fahrzeuge mit FAS sind in beiden Fällen über alle Ausstattungsraten

hinweg am kürzesten diesen kritischen Längsbeschleunigungen ausgesetzt, im Minimum nur 0,5 Sekunden bei 20%iger Ausstattung bei der Baustellenwarnung und 0,05 Sekunden bei der Stauendwarnung. Die niedrigsten Werte werden für alle Fahrzeuggruppen bei der Baustellenwarnung bei einer 20%igen Ausstattungsrate erreicht. Bei der Stauendwarnung senkt sich die mittlere TED für alle Fahrzeuggruppen mit steigender Ausstattungsrate. Bei 80%iger Ausstattung werden für alle Fahrzeuge die niedrigsten TED erreicht.

Die Fahrzeuge mit FAS haben einen Vorteil gegenüber den Fahrzeugen ohne FAS. Bei der Betrachtung der Wirkung auf das gesamte Fahrzeugkollektiv zeigen sich bei der Baustellenwarnung keine Unterschiede durch die Erhöhung der Ausstattungsrate. Die Verteilungen der TED für Fahrzeuge im verkehrssicherheitskritischen Bereich (mit TED > 0 s) sind in keiner untersuchten Kombination signifikant unterschiedlich. Es zeigt sich lediglich eine tendenzielle mittlere Reduktion der TED für den Vergleich der 0%igen Ausstattung mit der 20%igen. Für alle anderen Ausstattungsrate liegen die Werte im Mittel bei 0,6 Sekunden (siehe im Anhang Tabelle 6-7).

Für das Beispiel Stauendwarnung zeigen sich signifikante Reduktionen der TED für das gesamte Fahrzeugkollektiv mit steigender Ausstattungsrate (vgl. Tabelle 4-5). Lediglich für den Vergleich zwischen 20 und 50 % sind die Reduktionen nicht signifikant. Allerdings sind auch für die Stauendwarnung die absoluten Werte nur sehr gering. Die Fahrzeuge befinden sich im Nullfall im Mittel nur 0,12 Sekunden im kritischen Bereich und für die 80%ige Ausstattung mit FAS reduziert sich die Dauer auf 0,05 Sekunden.

Tabelle 4-5: Stauendwarnung: mittlere Expositionsdauer für TED>0 s für Längsbeschleunigungen kleiner $-4,5 \text{ m/s}^2$ pro Ausstattungsrate für alle Fahrzeuge, Signifikanztests zwischen den Ausstattungsratevarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert)

TED	Werte		Ausstattungsrate			
	Mittelwert [s]	Std.abw	0 %	20 %	50 %	80 %
0 %	0,12	0,35		d = -0,04 -35,70 % p = 0,000 *	d = -0,06 -45,41 % p = 0,000 *	d = -0,08 -62,67 % p = 0,000 *
20 %	0,08	0,28			d = -0,01 -15,11 % p = 0,484	d = -0,03 -41,95 % p = 0,012 *
50 %	0,07	0,23				d = -0,02 -31,62 % p = 0,040 *
80 %	0,05	0,17				

Time-Integrated-Critical-Deceleration (TID)

Bild 4-12 zeigt die Mittelwerte der Time-Integrated-Critical-Deceleration (TID) für die Baustellenwarnung und die Stauendwarnung über alle Fahrzeuge unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“ für die Variation der Ausstattungsrate. Die Fahrzeuge mit Fahrerassistenzsystem (mit FAS) sind in beiden Beispielen im Mittel über alle Ausstattungsrate hinweg am

wenigsten stark den kritischen Längsbeschleunigungen ausgesetzt. Die niedrigsten Werte werden bei der Baustellenwarnung bei einer 20%igen Ausstattungsrate erreicht, sowohl für das gesamte Fahrzeugkollektiv, als auch für die Fahrzeuge mit und ohne FAS. Bei der Stauendwarnung werden die niedrigsten Werte für alle Fahrzeuggruppen bei einer 80%igen Ausstattung erreicht.

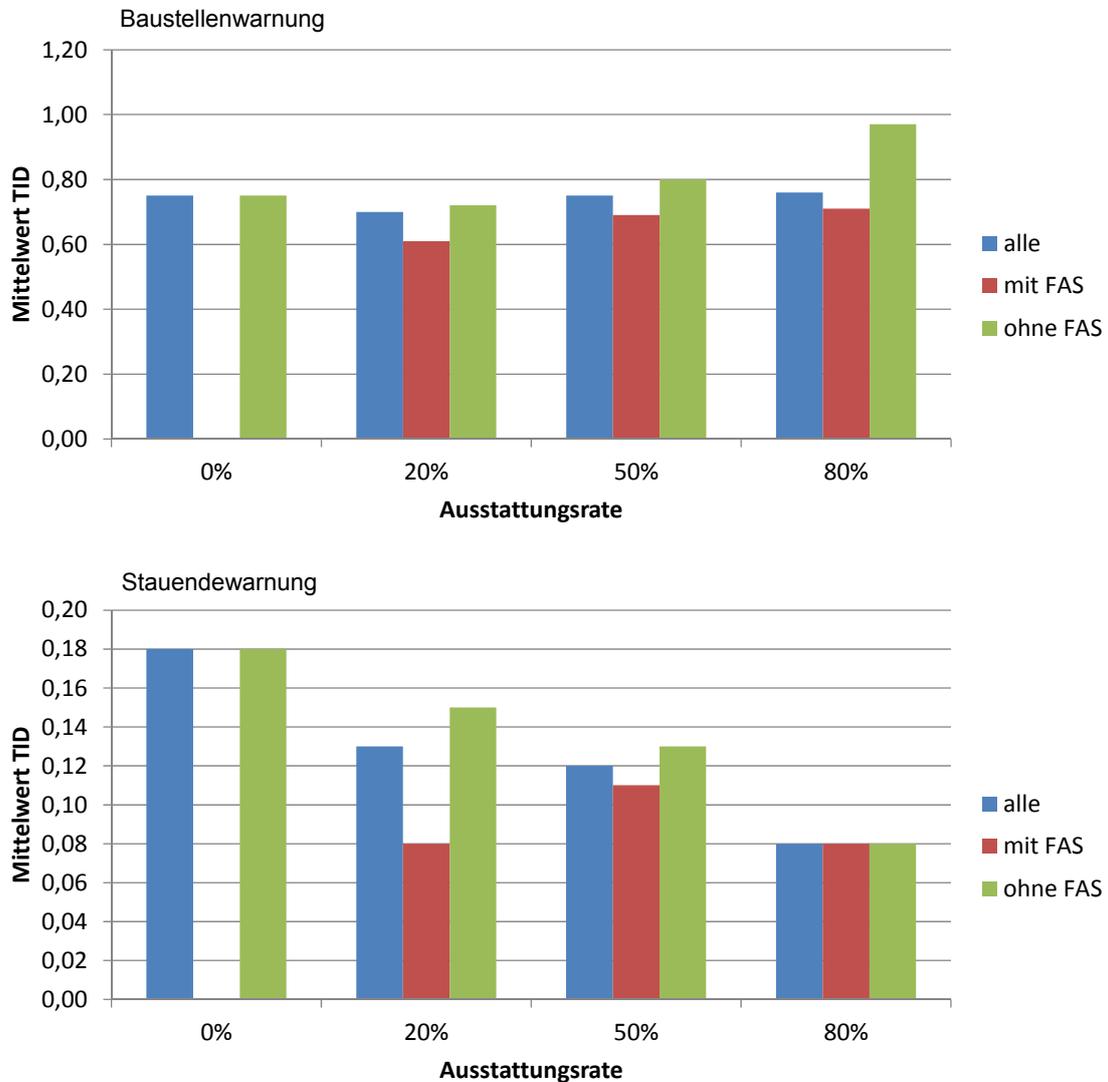


Bild 4-12: Baustellenwarnung (oben) und Stauendwarnung (unten): Mittelwerte der Time-Integrated-Critical-Deceleration (TID) über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsraten, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“

Die Betrachtung der TID für das gesamte Fahrzeugkollektiv zeigt allerdings für die Baustellenwarnung, dass die Verteilungen der TID in keiner Kombination signifikant unterschiedlich sind.

Für das Beispiel Stauendwarnung zeigen sich signifikante Reduktionen der TID für das gesamte Fahrzeugkollektiv mit steigender Ausstattungsrate (vgl. Tabelle 4-6). Lediglich für den Vergleich zwischen 20 und 50 % sind die Reduktionen nicht signifikant. Allerdings sind auch für die Stauendwarnung die absoluten Werte nur sehr gering.

Tabelle 4-6: Stauendwarnung: mittlere Expositionsstärke für TID > 0 s² für Längsbeschleunigungen kleiner -4,5 m/ s² pro Ausstattungsrate, Signifikanztests zwischen den Ausstattungsra-
tenvarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert)

TID	Werte		Ausstattungsrate			
Ausstattungsrate	Mittelwert [s ²]	Std.abw	0 %	20 %	50 %	80 %
0 %	0,18	0,58		d = -0,06 -30,65 % p = 0,000 *	d = -0,07 -36,09 % p = 0,000 *	d = -0,11 -57,60 % p = 0,000 *
20 %	0,13	0,49			d = -0,01 -7,85 % p = 0,571	d = -0,05 -38,86 % p = 0,018 *
50 %	0,12	0,43				d = -0,04 -33,65 % p = 0,043 *
80 %	0,08	0,30				

Anteil der Fahrzeuge mit $a_x < a_{x_krit} = - 4,5 \text{ m/s}^2$

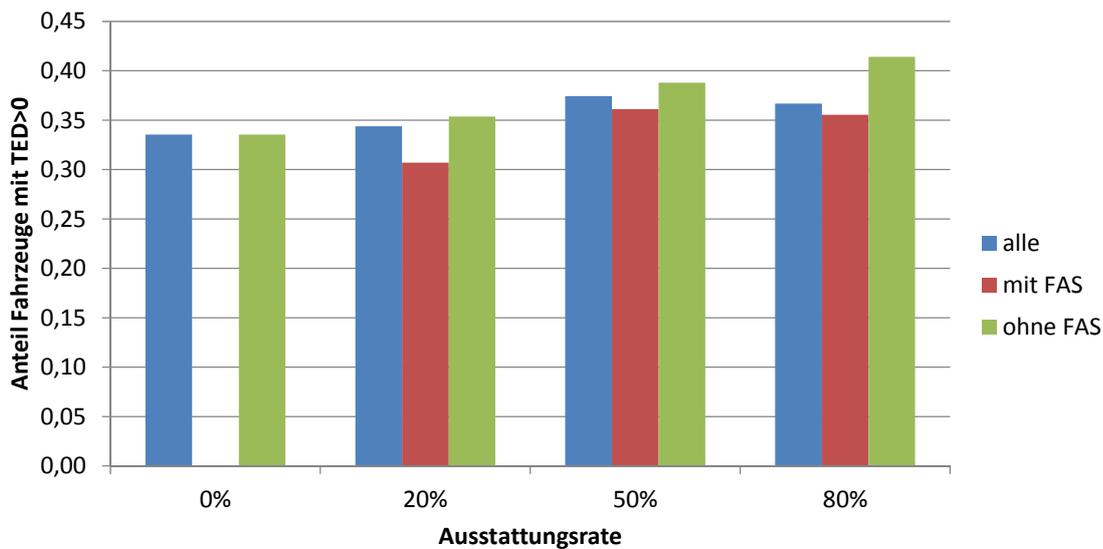


Bild 4-13: Baustellenwarnung: Anteile der Fahrzeuge, die eine kritische Längsbeschleunigung erfahren, über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsraten, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“

Bild 4-13 zeigt exemplarisch für die Baustellenwarnung die Anteile der Fahrzeuge, die eine kritische Längsbeschleunigung von kleiner $- 4,5 \text{ m/s}^2$ erfahren, für die Variation der Ausstattungsraten unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“. Die Fahrzeuge mit Fahrerassistenzsystem (mit FAS) sind im Mittel am wenigsten häufig den kritischen Längsbeschleunigungen ausgesetzt. Die niedrigsten Anteile (rd. 30 %) werden bei einer 20%igen Ausstattungsrate durch Fahrzeuge mit FAS erreicht. Für alle Fahrzeuge steigt der Fahrzeuganteil mit kritischen Bremsungen bei einer 20%igen und 50%igen Ausstattung und stagniert bei 80 % wieder leicht unter den Anteil, der bei einer 50%igen Ausstattung ermittelt wurde.

Verhältnis von TID/TED

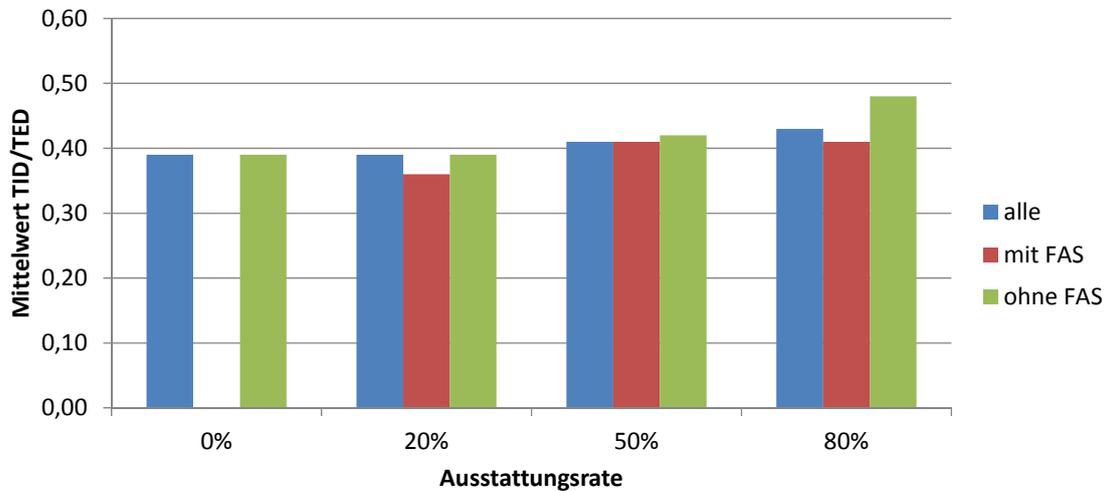


Bild 4-14: Baustellenwarnung: Verhältnisse von TID zu TED im Mittel über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsraten, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“

Bild 4-19 zeigt exemplarisch die Verhältnisse TID/TED für die Baustellenwarnung für die Variation der Ausstattungsraten. Ein kleinerer Wert für TID/TED bedeutet, dass die Stärke (TID) kleiner wird oder die Dauer (TED) zunimmt. Die geringsten Werte für TID/TED ergeben sich für die Fahrzeuge mit FAS bei einer Ausstattungsrate von 20 %. Die Unterschiede sind sehr gering.

Bei der Betrachtung des gesamten Fahrzeugkollektivs werden für den Nullfall die geringsten TID/TED Werte ermittelt. Für die Ausstattungsraten 50 und 80 % sind die Werte signifikant höher als für den Nullfall.

Tabelle 4-7: Verhältnis von TID/TED für Längsbeschleunigungen kleiner $-4,5 \text{ m/s}^2$ pro Ausstattungsrate, Signifikanztests zwischen den Ausstattungsratenvarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert)

Ausstattungsrate	TID/TED		Ausstattungsrate			
	Mittelwert [s]	Std.abw	0 %	20 %	50 %	80 %
0 %	0,39	0,67		d = -0,00 -0,31 % p = 1,000	d = 0,02 6,28 % p = 0,039 *	d = 0,04 9,84 % p = 0,044 *
20 %	0,39	0,67			d = 0,03 6,61 % p = 0,084	d = 0,04 10,18 % p = 0,084
50 %	0,41	0,69				d = 0,01 3,35 % p = 1,000
80 %	0,43	0,71				

4.3.3 Abstandsbezogene Kenngrößen

Nettozeitlücken

Neben der Betrachtung der minimalen Nettozeitlücken (th_{min}) werden Expositionsdauer (TETH) und -stärke (TITH) für Nettozeitlücken kleiner zweier unterschiedlicher definierten Schwellen für kritischen Nettozeitlücken von $th_{krit} = th < 0,8$ s bzw. $th_{krit} = th < 0,4$ s untersucht.

Die Time-Exposed-Critical-Time Headway (TETH) pro Fahrzeug berechnet sich zu:

$$TETH = \sum_{i=1}^N \delta_i(t) \cdot \tau_{sc}, \quad \text{mit} \quad \delta_i(t) = \begin{cases} 0 & \text{else} \\ 1 & \forall 0 < th(t) \leq th_{krit} \end{cases}$$

mit τ_{sc} als Simulationsschritt (hier 0,1 Sekunden) und gibt an, wie lang die Fahrzeuge im Mittel geringen zeitlichen Abständen zum Vorderfahrzeug ausgesetzt sind.

Die Time-Integrated-Critical-Time Headway (TITH) pro Fahrzeug berechnet sich zu:

$$TITH = \sum_{i=1}^N \int_0^T [th_{krit} - th(t)] dt, \quad \text{mit} \quad \forall 0 < th(t) \leq th_{krit}$$

und gibt an, wie stark und wie lang, die Fahrzeuge im Mittel geringen zeitlichen Abständen zum Vorderfahrzeug ausgesetzt sind.

Minimale Nettozeitlücken

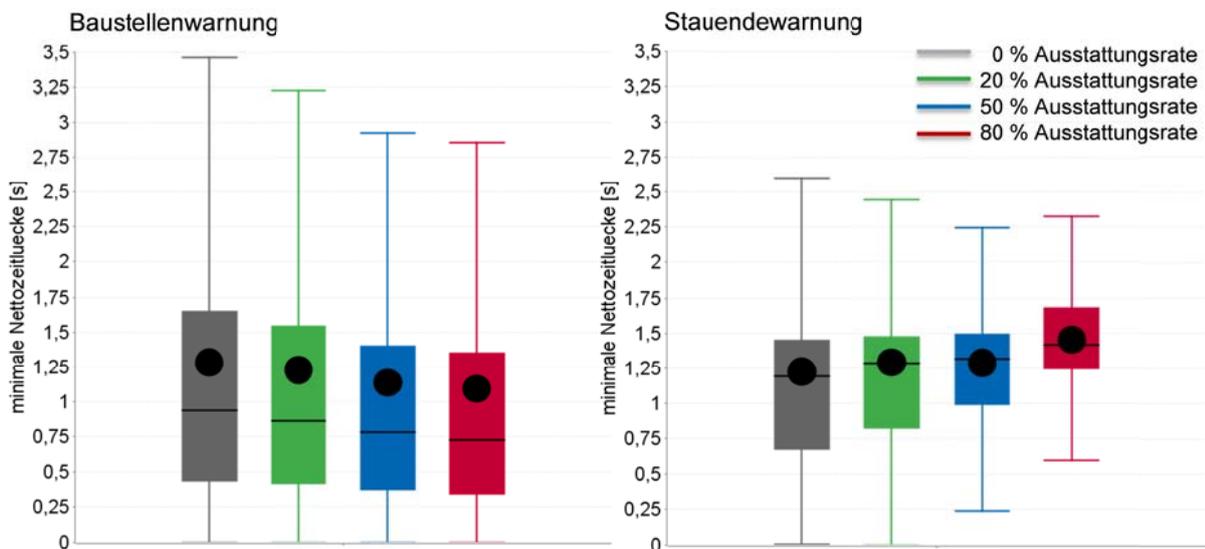


Bild 4-15: Vergleich der Verteilungen der minimalen Nettozeitlücken für die Baustellenwarnung (links) und für die Stauendwarnung (rechts) für die Variation der Ausstattungsraten mit FAS von 0, 20, 50 und 80 %

Bild 4-15 zeigt die Boxplots für die minimalen Nettozeitlücken im Vergleich zwischen unterschiedlichen Ausstattungsraten mit FAS von 0, 20, 50 und 80 %. Die minimalen Nettozeitlücken werden bei der Baustellenwarnung mit steigenden Ausstattungsraten niedriger. Ein Grund dafür können die Fahrstreifenwechsel sein, die mit steigendem Ausstattungsgrad durch die besser informierten Fahrzeuge forciert werden und dadurch geringere Abstände zwischen den Fahrzeugen verursachen. Auch die bereits bei der Validierung erläuterte, fehlerhafte Ausgabe von Nettozeitlücken von 0 Sekunden durch Fahrstreifenwechsel beeinflusst die oben gezeigten Verteilungen.

Bei der Stauendewarnung erhöhen sich die Mittelwerte der minimalen Nettozeitlücken mit steigendem Ausstattungsgrad und auch die Streuung der minimalen Werte wird mit zunehmender Ausstattung geringer.

Die Ergebnisse zwischen den verschiedenen Ausstattungsraten unterscheiden sich statistisch signifikant in allen Kombinationen - siehe Tabelle 4-8:

Tabelle 4-8: Stauendewarnung: minimale Nettozeitlücken pro Ausstattungsrate, Tests auf Normalverteilung der Daten und Signifikanztests zwischen den Ausstattungsratenvarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert)

Normalverteilungstest			Werte		Ausstattungsrate			
Ausstattungsrate	p-value	normalverteilt?	Mittelwert [s]	Std.abw	0 %	20 %	50 %	80 %
0 %	0,14	ja	1,23	0,85		d = 0,07 5,47 % p = 0,000 *	d = 0,06 5,10 % p = 0,000 *	d = 0,23 18,60 % p = 0,000 *
20 %	0,15	ja	1,29	0,84			d = -0,00 -0,35 % p = 0,000 *	d = 0,16 12,45 % p = 0,000 *
50 %	0,16	ja	1,29	0,68				d = 0,17 12,84 % p = 0,000 *
80 %	0,16	ja	1,45	0,68				

Time-Exposed-Critical-Time Headway (TETH)

Die Betrachtung der Expositionsdauer und -stärke für die Bereiche mit kritischen Nettozeitlücken wird für zwei unterschiedliche Kritikalitätsschwellen durchgeführt $th_{krit} = th < 0,8$ s und $th_{krit} = th < 0,4$ s. Es zeigen sich allerdings für den Vergleich der unterschiedlichen Ausstattungsraten keine wesentlich unterschiedlichen Aussagen, so dass im Folgenden lediglich auf die Betrachtung mit $th_{krit} = th < 0,8$ s eingegangen wird.

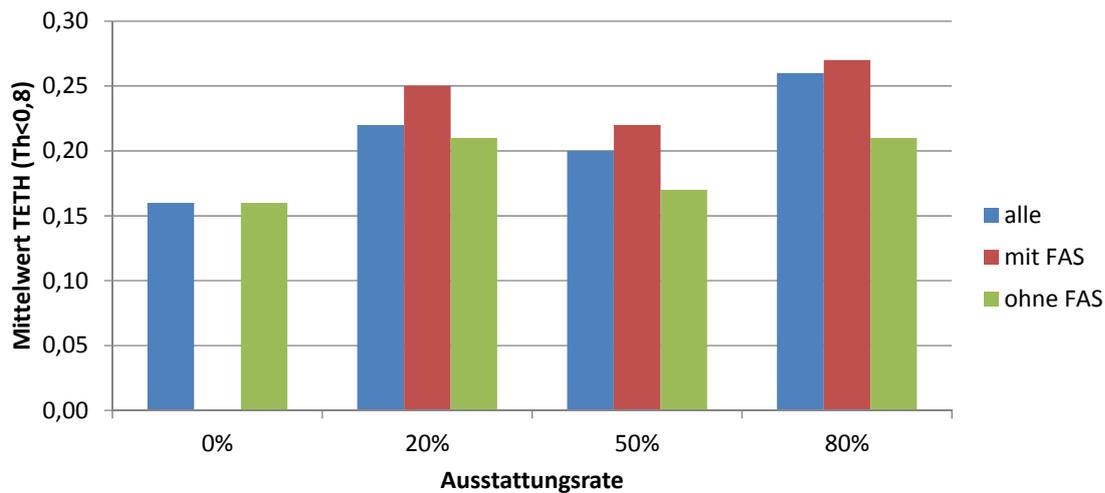


Bild 4-16: Baustellenwarnung: Mittelwerte der Time-Exposed-Critical-Time Headway (TETH) für $th < 0,8$ über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsrate, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“

Bild 4-16 zeigt exemplarisch die Mittelwerte der Time-Exposed-Critical-Time Headway für die Baustellenwarnung über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsrate, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“. Die niedrigsten Werte werden für den Nullfall erreicht. Die Fahrzeuge mit FAS sind länger den geringen Nettozeitlücken ausgesetzt als die Fahrzeuge ohne FAS.

Gemäß Tabelle 4-9 sind die TETH aller Ausstattungsrate für alle Fahrzeuge verglichen mit dem Nullfall signifikant höher. Auch die Änderung zwischen 20 % und 80 % ist signifikant, ebenso für das 50 und 80 % Szenario. Beim Vergleich zwischen 20 und 50 % zeigen sich Verringerungen der TETH, die allerdings nicht signifikant sind.

Tabelle 4-9: Time-Exposed-Critical-Time Headway (TETH) - Signifikanztests zwischen den Ausstattungsratevarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert)

TETH	Werte		Ausstattungsrate			
	Mittelwert [s]	Std.abw	0 %	20 %	50 %	80 %
0 %	0,16	0,65		d = 0,06 36,41 % p = 0,000 *	d = 0,04 21,64 % p = 0,000 *	d = 0,09 58,37 % p = 0,000 *
20 %	0,22	0,74			d = -0,02 -10,83 % p = 0,396	d = 0,04 16,10 % p = 0,003 *
50 %	0,20	0,71				d = 0,06 30,20 % p = 0,024 *
80 %	0,26	0,87				

Time-Integrated-Critical-Time Headway (TITH)

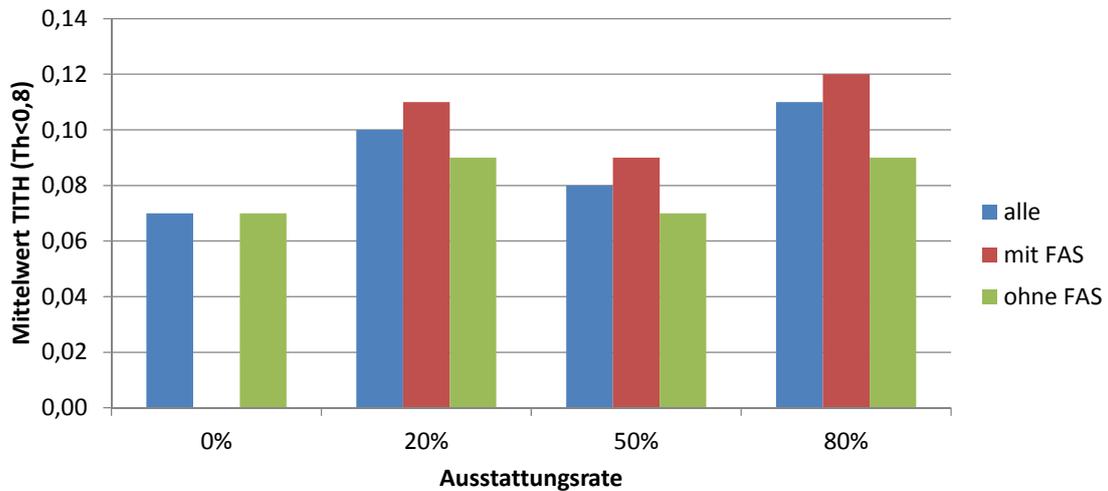


Bild 4-17: Baustellenwarnung: Mittelwerte der Time-Integrated-Critical-Time Headway (TITH) für $th < 0,8$ über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsraten, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“

Bild 4-17 zeigt für die Baustellenwarnung die Mittelwerte der Time-Integrated-Critical-Time Headway über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsraten, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“. Die niedrigsten Werte werden für die Fahrzeuge ohne FAS für den Nullfall und auch im 50 % Szenario erreicht. Die Fahrzeuge mit FAS sind den geringen Nettozeitlücken unter 0,8 Sekunden über alle Ausstattungsraten hinweg am stärksten ausgesetzt. Gemäß Tabelle 4-10 sind die TITH aller Ausstattungsraten für alle Fahrzeuge verglichen mit dem Nullfall signifikant höher. Auch das 20 % und das 80 % Szenario, sowie das 50 % und 80 % unterscheiden sich signifikant. Beim Vergleich zwischen 20 und 50 % zeigen sich Reduktionen der mittleren TITH, die allerdings nicht signifikant sind.

Tabelle 4-10: Time-Integrated-Critical-Time Headway (TITH) für $th < 0,8$ - Signifikanztests zwischen den Ausstattungsratenvarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert)

TITH Ausstattungsrate	Werte		Ausstattungsrate			
	Mittelwert [s ²]	Std.abw	0 %	20 %	50 %	80 %
0 %	0,07	0,27		d = 0,03 43,35 % p = 0,000 *	d = 0,02 24,70 % p = 0,000 *	d = 0,04 65,19 % p = 0,000 *
20 %	0,10	0,33			d = -0,01 -13,01 % p = 0,412	d = 0,01 15,23 % p = 0,003 *
50 %	0,08	0,31				d = 0,03 32,47 % p = 0,024 *
80 %	0,11	0,39				

Anteil der Fahrzeuge mit $t_h < 0,8$ s

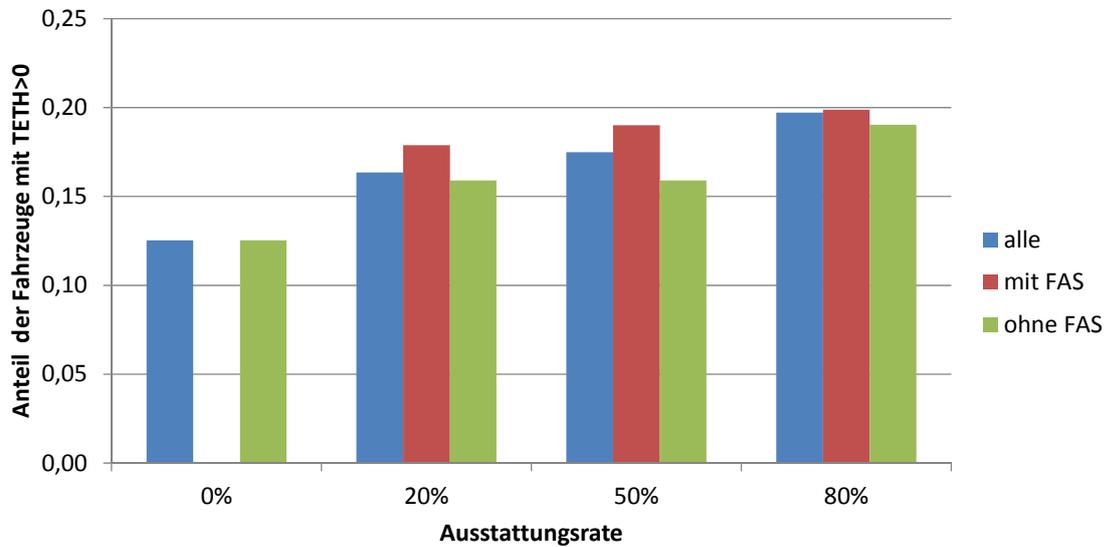


Bild 4-18: Baustellenwarnung: Anteile der Fahrzeuge, die eine kritische Nettozeitlücke erfahren, über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsrate, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“

Bild 4-18 zeigt exemplarisch für die Baustellenwarnung die Anteile der Fahrzeuge, die eine kritische Nettozeitlücke von kleiner 0,8 s erfahren, für die Variation der Ausstattungsrate. Die Anteile der Fahrzeuge steigen mit zunehmender Ausstattungsrate. Die Fahrzeuge mit FAS zeigen die größten Anteile kritischer Nettozeitlücken.

Time-to-Collision

Neben der Betrachtung der minimalen Time-to-Collision (TTC_{min}) werden Expositionsdauer (TETTC) und -stärke (TITTC) für Time-to-Collisions kleiner zweier unterschiedlicher Schwellen für kritische TTC von $TTC_{krit} = TTC < 4$ s bzw. $TTC_{krit} = TTC < 2$ s untersucht.

Die Time-Exposed-Critical-TTC (TETTC) pro Fahrzeug berechnet sich zu:

$$TETTC = \sum_{i=1}^N \delta_i(t) \cdot \tau_{sc}, \quad \text{mit} \quad \delta_i(t) = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad \forall 0 < TTC(t) \leq TTC_{krit} \quad \text{else}$$

mit τ_{sc} als Simulationsschritt (hier 0,1 Sekunden) und gibt an, wie lang die Fahrzeuge im Mittel geringen TTC zum Vorderfahrzeug ausgesetzt sind.

Die Time-Integrated-Critical-TTC (TITTC) pro Fahrzeug berechnet sich zu:

$$TITTC = \sum_{i=1}^N \int_0^T [TTC_{krit} - TTC(t)] dt, \quad \text{mit} \quad \forall 0 < TTC(t) \leq TTC_{krit}$$

und gibt an, wie stark und wie lang, die Fahrzeuge im Mittel geringen TTC zum Vorderfahrzeug ausgesetzt sind.

Minimale TTC

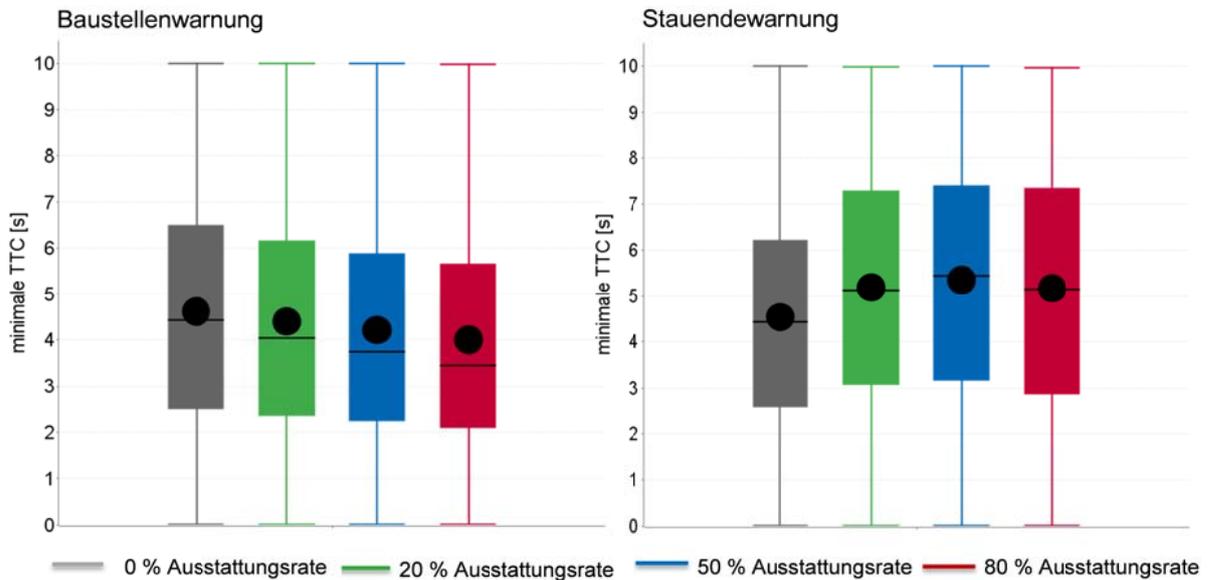


Bild 4-19: Baustellenwarnung (links) und Stauendewarnung (rechts) Vergleich der Verteilungen der minimalen TTC für die Variation der Ausstattungsraten mit FAS von 0, 20, 50 und 80 %

Bild 4-19 zeigt die Boxplots für die minimalen TTC für die Baustellenwarnung und für die Stauendewarnung jeweils im Vergleich zwischen unterschiedlichen Ausstattungsraten mit FAS von 0, 20, 50 und 80 %. Bei der Baustellenwarnung werden die minimalen TTC mit steigenden Ausstattungsraten niedriger. Die Ergebnisse zwischen den verschiedenen Ausstattungsraten unterscheiden sich in allen Kombinationen statistisch signifikant. Ein Grund dafür können ebenso die Fahrstreifenwechsel sein, die mit steigendem Ausstattungsgrad eher durch die besser informierten Fahrzeuge forciert werden und dadurch geringere TTC zwischen den Fahrzeugen verursachen.

Für die Stauendewarnung erhöhen sich die TTC durch die Ausrüstung mit FAS jeweils signifikant, verglichen mit dem Nullfall. Zwischen 20, 50 und 80%iger Ausstattung unterscheiden sich die Verteilungen der minimalen TTC nicht signifikant.

Die Ergebnistabellen und Signifikanzanalysen können dem Anhang entnommen werden.

Time-Exposed-Critical-TTC (TETTC)

Die Betrachtung der Expositionsdauer und -stärke für die Bereiche mit kritischen TTC wird für zwei unterschiedliche Kritikalitätsschwellen durchgeführt $TTC_{krit} = TTC < 4 \text{ s}$ und $TTC_{krit} = TTC < 2 \text{ s}$. Es zeigen sich allerdings für den Vergleich der unterschiedlichen Ausstattungsraten keine wesentlich unterschiedlichen Aussagen, so dass im Folgenden lediglich auf die Betrachtung mit $TTC_{krit} = TTC < 4 \text{ s}$ eingegangen wird.

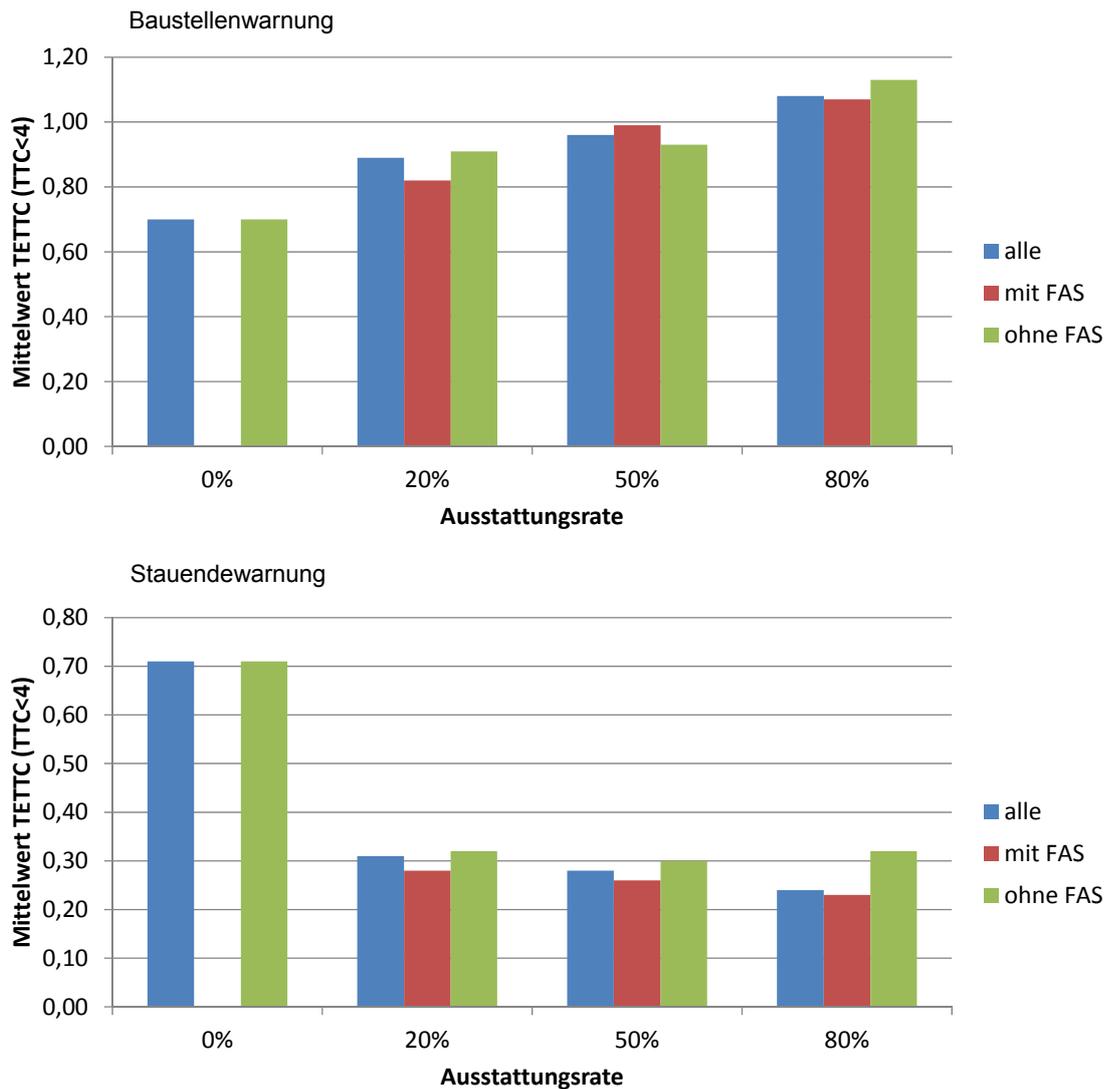


Bild 4-20: Baustellenwarnung (oben) und Stauendewarnung (unten): Mittelwerte der Time-Exposed-Critical-TTC (TETTC) für $TTC < 4$ über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsraten, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“

Bild 4-20 zeigt die Mittelwerte der Time-Exposed-Critical-TTC für die beiden Untersuchungsbeispiele Baustellenwarnung und Stauendewarnung über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsraten, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“. Bei der Baustellenwarnung werden die niedrigsten Werte für den Nullfall ermittelt. Mit steigender Ausstattungsrate steigen für alle Fahrzeuggruppen die Dauern, denen sie $TTC < 4$ Sekunden ausgesetzt sind. Die Änderungen sind in allen Kombinationen statistisch signifikant.

Bei der Stauendewarnung werden die niedrigsten Werte für die Fahrzeuge mit FAS bei 80%iger Ausstattung ermittelt. Die höchsten mittleren TETTC zeigen sich im Nullfall, schon durch eine 20%ige Ausstattung mit FAS werden die TETTC für alle Fahrzeuge mehr als halbiert. Gemäß Tabelle 4-11 verringern sich die TETTC aller Fahrzeuge für die Stauendewarnung durch die Nutzung von FAS mit steigenden Ausstattungsraten statistisch signifikant für alle Ausstattungsraten verglichen mit dem Nullfall.

Tabelle 4-11: Stauendewarnung: Time-Exposed-Critical-TTC (TETTC) - Signifikanztests zwischen den Ausstattungsratevarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert)

TETTC Ausstattungsrate	Werte		Ausstattungsrate			
	Mittelwert [s]	Std.abw	0 %	20 %	50 %	80 %
0 %	0,71	1,52		d = -0,40 -56,70 % p = 0,000 *	d = -0,44 -61,03 % p = 0,000 *	d = -0,47 -66,08 % p = 0,000 *
20 %	0,31	0,96			d = -0,03 -10,00 % p = 0,967	d = -0,07 -21,66 % p = 0,683
50 %	0,28	0,82				d = -0,04 -12,96 % p = 0,683
80 %	0,24	0,70				

Time-Integrated-Critical-TTC (TITTC)

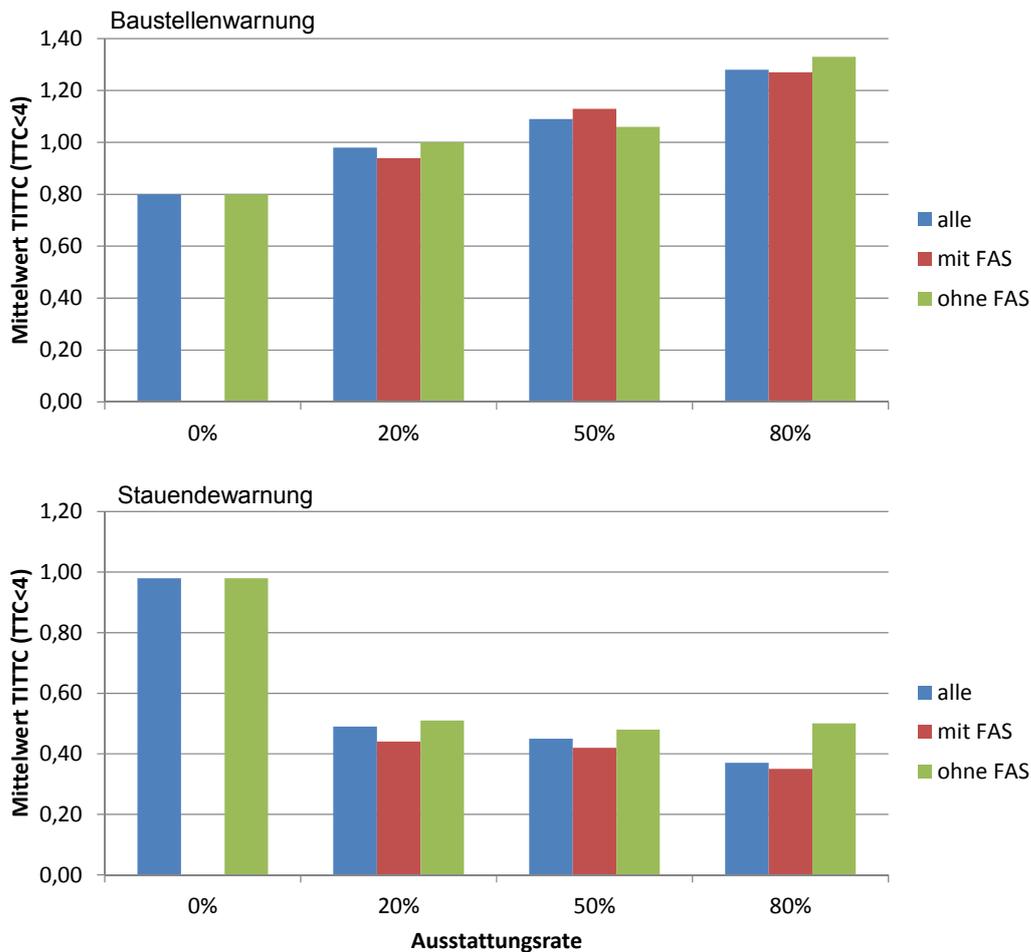


Bild 4-21: Baustellenwarnung (oben) und Stauendewarnung (unten): Mittelwerte der Time-Integrated-Critical-TTC für die Baustellenwarnung und die Stauendewarnung über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsrate, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“

Bild 4-21 zeigt die Mittelwerte der Time-Integrated-Critical-TTC für die Baustellenwarnung und die Stauendwarnung über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsraten, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“.

Bei der Stauendwarnung reduzieren sich die TITTC ebenso wie zuvor die TETTC ab einer Ausstattungsrate von 20 % signifikant gegenüber dem Nullfall. Im Vergleich der Ausstattungsraten zeigen sich zwischen 20, 50 und 80%iger Ausstattung keine signifikanten Unterschiede mehr.

Bei der Baustellenwarnung werden die niedrigsten Werte für TITTC für den Nullfall ermittelt. Mit steigender Ausstattungsrate erhöht sich die Expositionstärke für die Baustellenwarnung für alle Fahrzeuggruppen signifikant in allen Kombinationen (Tabelle 4-12).

Tabelle 4-12: Baustellenwarnung: Time-Exposed-Critical-Time Headway (TITTC) - Signifikanztests zwischen den Ausstattungsratenvarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert)

TITTC	Werte		Ausstattungsrate			
	Mittelwert [s ²]	Std.abw	0 %	20 %	50 %	80 %
0 %	0,80	2,05		d = 0,18 22,49 % p = 0,000 *	d = 0,29 35,80 % p = 0,000 *	d = 0,48 59,51 % p = 0,000 *
20 %	0,98	2,24			d = 0,11 10,87 % p = 0,000 *	d = 0,30 30,22 % p = 0,000 *
50 %	1,09	2,23				d = 0,19 17,46 % p = 0,000 *
80 %	1,28	2,38				

4.3.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Für die Untersuchungsbeispiele wurde exemplarisch eine Wirkungsermittlung für die in Abschnitt 2.3.3 definierten Kenngrößen durchgeführt. Geschwindigkeit, Beschleunigung und Abstandsverhalten wurden hinsichtlich der Variation der Ausstattungsraten und dessen Einfluss auf das Fahrzeugkollektiv auf statistisch signifikante Unterschiede untersucht. Die Ergebnisse werden im Folgenden kurz zusammengefasst und hinsichtlich ihrer Eignung für Aussagen zur Verkehrssicherheit diskutiert.

Für die geschwindigkeitsbezogenen Kenngrößen zeigt sich in beiden Untersuchungsfällen, dass durch die Analyse des Verlaufs der mittleren Geschwindigkeit gut auf die räumliche Wirkweise der Funktionen geschlossen werden kann. Es zeigen sich deutliche Unterschiede durch die Variation der Ausstattungsraten. Mit steigender Ausstattungsrate wird früher und stärker auf die verkehrssicherheitskritische Situation reagiert. Die Wirksamkeit hinsichtlich der Verkehrssicherheit kann mit Hilfe dieser Betrachtung in beiden Untersuchungsbeispielen ermittelt werden. Die Situationen werden mit zunehmender Ausstattung mit FAS sicherer.

Die Verteilungen der mittleren Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten zeigen in beiden Fällen die Verringerung der Geschwindigkeiten und dadurch können die Situationen sicherer durchfahren werden. Signifikanztests bestätigen, dass sich die Geschwindigkeiten durch die Erhöhung der Ausstattungsraten statistisch signifikant reduzieren.

Weiterhin wurde die Wirkung der Assistenzsysteme auf die Längsbeschleunigung untersucht. Durch die Erhöhung der Ausstattungsraten mit dem System Baustellenwarnung werden die minimalen Längsbeschleunigungen für alle Fahrzeuge kleiner. Die Fahrzeuge bremsen signifikant stärker, die absoluten Unterschiede sind allerdings gering. Die mittleren Bremsungen sind in dem Beispiel mit -3 bis -4 m/s^2 im Mittel höher als die Kritikalitätsschwelle von $-4,5 \text{ m/s}^2$. Die Interpretation dieser Ergebnisse bezüglich der Aussagekraft zur Bewertung der Verkehrssicherheit ist schwierig. Durch Fahrerassistenzsysteme wird der Fahrer früher auf Gefahren hingewiesen. Starke Bremsungen sollen eigentlich vermieden werden. Stärkeres Bremsen in kritischen Situationen kann aber sogar die Verkehrssicherheit erhöhen, die Fahrer reagieren durch die Warnung ggf. stärker und dadurch angepasster auf die Situation. Gerade bei Situationen, die einen Fahrstreifenwechsel erfordern, kann die stärkere Bremsung sicherer sein.

Bei der Stauendewarnung zeigen sich erwartungsgemäße Ergebnisse. Die Fahrzeuge bremsen mit zunehmender Ausstattungsrate weniger stark. Die Ergebnisse sind statistisch signifikant.

Zusätzlich wurden die Time-Exposed-Critical-Deceleration (TED) und die Time-Integrated-Critical-Deceleration (TID) betrachtet. Es zeigt sich in beiden Beispielen, dass die Fahrer mit FAS kürzer und geringer den kritischen Längsbeschleunigungen $<-4,5 \text{ m/s}^2$ ausgesetzt sind. Bei der Baustellenwarnung zeigen sich für TED und TID für das Fahrzeugkollektiv durch zunehmende Ausstattung keine signifikanten Unterschiede. Für die Stauendewarnung zeigen sich signifikante Reduktionen für TED und TID für alle Fahrzeuge.

Für die abstandsbezogenen Kenngrößen zeigen sich auch gegenläufige Ergebnisse für die Baustellenwarnung und die Stauendewarnung. Bei der Baustellenwarnung werden die minimalen Nettozeitlücken mit steigender Ausstattung geringer, was im Allgemeinen als unsicherer bewertet wird. Allerdings können auch stark forcierte Fahrstreifenwechsel, aufgrund der bekannten Sperrung, zu geringen Nettozeitlücken führen. In dieser Situation ist es sicherer den Fahrstreifen zu wechseln. Bei der Stauendewarnung erhöhen sich die minimalen Nettozeitlücken mit steigender Ausstattung. Bei der Stauendewarnung sind keine Fahrstreifenwechsel als Fahrerreaktion notwendig.

Allerdings hat sich im Verlauf der Untersuchungen gezeigt, dass die Auswertung der Nettozeitlücken in der Verkehrssimulation nur bedingt geeignet ist. In der derzeitigen Implementierung werden während der Fahrstreifenwechsel teilweise fälschlicherweise Nettozeitlücken von 0 Sekunden ausgegeben, obwohl sich die Fahrzeuge bereits auf unterschiedlichen Fahrstreifen befinden.

Auch für die kritischen Nettozeitlücken wurden Expositionsdauer und -stärke exemplarisch für die Baustellenwarnung untersucht. Für diese Kenngröße zeigen sich für die Fahrzeuge mit FAS höhere Expositionsauern und -stärken. Allerdings ist auch hier die Aussagekraft fraglich wegen den o.g. falsch angegebenen Nettozeitlücken gerade im geringen Bereich.

Die Betrachtung der minimalen Time-To-Collision zeigt ebenso eine Verringerung bei der Baustellenwarnung und eine Erhöhung bei der Stauendwarnung. Gleiche Aussagen liefern die Untersuchung der Expostionsdauer und -stärke.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Untersuchung der Expositionsdauer und -intensität für die einzelnen Kenngrößen eine gute Möglichkeit ist, weitere Erkenntnisse über das Wirkpotential zu erzielen. Häufig zeigen diese Kenngrößen sehr viel detaillierter die Wirkung einer Funktion als der Vergleich von beispielsweise Minimalwerten. Die zeitliche Ausgesetzttheit und Stärke der Ausprägung repräsentieren eher die Kritikalität einer Situation.

Aufgrund der Fahrstreifenwechsel und fälschlicherweise ausgegebenen Nettozeitlücken von 0 Sekunden, müssen gerade die geringen Nettozeitlücken mit Vorsicht betrachtet werden. Damit sind Nettozeitlücken in der jetzigen Integration in die Software nicht ohne weiteres verwendbar. Bei der Stauendwarnung sind Fahrstreifenwechsel nicht zwingend erforderlich und damit auch nicht so häufig vorhanden. Der Einfluss der falschen Nettozeitlückenausgabe ist bei diesem Beispiel nicht so hoch. Es zeigen sich gute Interpretationsmöglichkeiten für die Untersuchungen der Nettozeitlücken und auch Time-To-Collision-Werte. Daher werden diese Kenngrößen als grundsätzlich geeignet für die Verkehrssicherheitsanalyse angesehen.

Ob eine Veränderung von Kenngrößen eine positive oder eine negative Wirkung auf die Verkehrssicherheit hat, hängt von den Gegebenheiten der jeweiligen Untersuchungssituation, der Signifikanz der Ergebnisse und auch der Stärke der Ausprägung ab. Die Ergebnisse müssen immer im situativen Zusammenhang interpretiert werden. Wenn zwingend notwendige Fahrstreifenwechsel zu Verkleinerungen von Nettozeitlücken führen, muss dies nicht unbedingt unsicherer sein. Hier kann beispielsweise eine detailliertere Untersuchung der Nettozeitlücken pro Fahrstreifen oder pro möglicher Vorderfahrzeug und Folgefahrzeugkonstellationen weitere Erkenntnisse ermöglichen. Auch die bereits angesprochene detaillierte Modellierung der Fahrerreaktion auf die Fahrzeuge mit FAS wird für weitere Untersuchungen empfohlen.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In der vorliegenden Arbeit wurde der Fragestellung nachgegangen, ob die detaillierte Nachbildung des individuellen Fahrerverhaltens in verkehrssicherheitskritischen Situationen in der Verkehrssimulation einen Mehrwert für die simulative Wirkungsanalyse von intelligenten Verkehrssystemen liefern kann. Neben der Beantwortung dieser Frage war das Ziel, eine Methode aufzuzeigen, wie zukünftig eine simulative Analyse der Wirkungen von Intelligenten Verkehrs- und Fahrerassistenzsystemen mit erhöhter Aussagekraft der Ergebnisse ermöglicht werden kann.

Zunächst wurden Grundlagen für die Modellierung und Bewertung von Fahrerverhalten in verkehrssicherheitskritischen Situationen zusammengestellt. Die wichtigsten Grundlagen umfassen die begriffliche Eingrenzung der verkehrssicherheitskritischen Situation und die Zusammenstellung der relevanten Voraussetzungen für eine simulative Verkehrssicherheitsanalyse auch ohne die Verwendung von Unfallanzahlen als Bewertungskriterium. Die für die weitere Bearbeitung verwendeten Annahmen und Schlussfolgerungen wurden dargelegt. Die verkehrssicherheitskritische Sondersituation wurde definiert als eine Situation, die im Allgemeinen als warnwürdig und gefährlich verstanden wird. Andere Verkehrsteilnehmer und auch weitere äußere Einflüsse, wie z. B. Baustellen oder Fahrstreifenreduktionen, beeinflussen für eingrenzbare Zeit- oder Streckenabschnitte das Fahrerverhalten.

Es wurde gezeigt, worin der Mehrwert von Verkehrssicherheitsanalysen mit Hilfe der Verkehrssimulation liegt, verglichen mit anderen Versuchsumgebungen. Simulationen bieten den Vorteil, dass einzelne Modellparameter verändert und Wirkungen unter sonst identischen Randbedingungen ermittelt und miteinander verglichen werden können. Der Nutzen einer modifizierten Verkehrssimulation für verkehrssicherheitskritische Sondersituationen liegt in der Untersuchung der Wirkung durch neue Assistenzsysteme auf den gesamten Verkehr - für z. B. vergleichende Analysen verschiedener Ausstattungsstufen oder -alternativen.

Die Betrachtung des Unfallgeschehens zeigte, dass gerade die fahrerspezifisch unterschiedliche Wahrnehmung der Umwelt und das teilweise fehlerbehaftete Fahrerverhalten in Längs- und Querrichtung in der Fahrermodellierung berücksichtigt werden sollte. Dabei wird die detaillierte Modellierung der Ursachen für Fehlverhalten, wie z. B. Ablenkung, für die vorliegende Fragestellung als zu komplex angesehen. Stattdessen wird es als sinnvoll erachtet, die Wirkungen dieses Fehlverhaltens, z. B. der verspätete Reaktionsbeginn bzw. die nicht angepasste Geschwindigkeit, zu modellieren.

Es wurden Alternativen zur bisherigen Bewertung der Verkehrssicherheit mit Verkehrsunfällen vorgestellt. Dabei ergab sich, dass mikroskopische Ersatzkenngrößen und die Verwendung von Kritikalitätsschwellen oder der relative Vergleich von Systemalternativen für die vorliegende Fragestellung genutzt werden können. Eine Zusammenstellung möglicher Kenngrößen zur Modellierung und Bewertung von Verkehrssicherheit hat gezeigt, dass die notwendigen Eingangsgrößen für die Modellierung und entsprechende Ausgangsgrößen theo-

retisch vorhanden sind. Weiterhin hat sich gezeigt, dass die Betrachtung von Expositionsdauer und -intensität verschiedener Kenngrößen weitere Erkenntnisse zur Wirkung auf die Verkehrssicherheit bieten kann.

Bestehende Simulationsansätze und Simulationswerkzeuge wurden vorgestellt und hinsichtlich der Anforderungen aus der vorliegenden Fragestellung bewertet. Es wurde gezeigt, dass für die Modellierung des, u. a. fehlerbehafteten, Fahrerverhaltens in Längs- und Querrichtung die Gruppe der psycho-physischen Modelle besonders geeignet ist. Diese Art der Modelle bietet durch die Verwendung von z. B. Wahrnehmungsschwellen die für den Untersuchungsgegenstand erforderliche Variabilität in der Fahrermodellierung um auch fehlerbehaftetes Verhalten zu modellieren. Für die Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit wurde die mikroskopische Verkehrssimulationssoftware Vissim verwendet.

Die verschiedenen Stufen für die Modellbildung des vorgeschlagenen Modellansatzes (prinzipielles Vorgehen bei der Fahrermodellierung, Aufbereitung der Eingangsdaten und Modellierung der Stellgrößen für die Verkehrssimulation) wurden anhand von zwei repräsentativen Untersuchungssituationen vorgestellt. Es wurden die Beispiele Annäherung an eine Wanderbaustelle mit Fahrstreifenreduktion und Annäherung an ein Stauende jeweils mit unterschiedlichen Ausstattungsraten kommunikationsbasierter Fahrerwarnungssysteme untersucht.

Der entwickelte Modellierungsansatz basiert auf realen, räumlich und zeitlich detaillierten Fahrerdaten verschiedener Fahrer in vergleichbaren Untersuchungssituationen. Die Erhebung der Eingangsdaten erfolgte in einer Fahrsimulation. Es werden typische Fahrerreaktionen auf das Ereignis identifiziert. Diese münden in stochastische Verteilungen charakteristischer Fahrerverhaltensparameter. Das Fahrerverhalten wird in der Verkehrssimulation lediglich im Bereich der verkehrssicherheitskritischen Situation modifiziert. Für die Untersuchungsbeispiele Wanderbaustelle mit Fahrstreifenreduktion und Annäherung an ein Stauende wurden Annahmen für das geänderte Fahrerverhalten aufgestellt und die Eingangsdaten daraufhin untersucht. Ausgehend von modellierten Stimuli wird zu bestimmten Zeiten oder an bestimmten Orten das Fahrerverhalten durch die Zuweisung neuer Wunschgeschwindigkeiten oder eines Fahrstreifenwechselwunsches modifiziert. Da die Größen der vorliegenden Stichproben der Eingangsdaten nach der Unterteilung in verschiedene Fahrerteilgruppen teilweise sehr gering waren, ließen sich keine allgemeingültigen Aussagen zum Fahrerverhalten in den Untersuchungssituationen ableiten. Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit lag allerdings auch auf der Untersuchung, ob der vorgestellte Modellierungsansatz prinzipiell umsetzbar ist. Dieser Machbarkeitsnachweis ist auch mit den genannten Einschränkungen möglich gewesen.

Für die exemplarische Modellanwendung und Bewertung wurde zunächst geprüft, ob das modellierte Fahrerverhalten mit dem Verhalten der realen Fahrer übereinstimmt. Die Abbildung des Fahrerverhaltens in der Verkehrssimulation ist nicht identisch mit den Beobachtungen der Basisdaten in der Fahrsimulation. Das Geschwindigkeits- und das Abstandsverhal-

ten wird ähnlich nachgebildet, wie in den Basisdaten beobachtet. Trotz der punktuellen Manipulation der Wunschgeschwindigkeiten kann das Verhalten über den Ort annäherungsweise nachgebildet werden. Allerdings zeigen sich systematische Schwächen beim direkten Vergleich. Ein Grund dafür können teilweise nicht identische Verkehrszustände in den beiden Versuchsumgebungen sein. Diese beeinflussen gerade das Geschwindigkeits- und Abstandsverhalten sehr stark. Auch zeigt eine Unstetigkeit im Verlauf der Nettozeitlücken in der Fahrsimulation, dass die Größe des empirischen Datensatzes für die Validierung zu gering gewesen sein dürfte. Daher werden trotz der grundsätzlichen Validität weitere Untersuchungen zu diesem Themenbereich empfohlen. Das Modell wurde für die Prüfung der prinzipiellen Machbarkeit des vorgeschlagenen Vorgehens, trotz dieser bekannten Abweichungen, weiterverwendet.

Für die beiden Untersuchungsbeispiele wurde exemplarisch die Wirkungsermittlung für definierte Kenngrößen mit Bezug zur Geschwindigkeit, zur Beschleunigung und zum Abstandsverhalten durchgeführt. Die Ergebnisse wurden in Bezug auf Unterschiede zwischen den Ausstattungsraten und deren Einfluss auf das Fahrzeugkollektiv untersucht und hinsichtlich statistisch signifikanter Unterschiede ausgewertet.

Zusammenfassend zeigt sich für die Wirkungsermittlung, dass gerade die Verwendung der Expositionsdauer und -intensität für die einzelnen Kenngrößen eine gute Möglichkeit darstellt, erweiterte Erkenntnisse über das Wirkpotential zu erzielen. Häufig zeigen diese Kenngrößen sehr viel detaillierter die Wirkung einer Funktion als der Vergleich von beispielsweise Minimalwerten.

Der entwickelte Modellierungsansatz ermöglicht theoretisch die Modellierung eines breiten Spektrums an Situationen, Verkehrsteilnehmern, verkehrstechnischen Systemen und Verkehrsbereichen. Mit dem gewählten Vorgehen ist ebenso die Modellierung des Verhaltens im innerstädtischen Bereich wie auch von Landstraßenszenarien mit Gegenverkehr denkbar, sofern Eingangsgrößen für die Modellierung des Fahrerhaltens in genügend großer Stichprobe vorhanden sind. Auch sehr viele Arten von ITS und FAS (kooperativ oder konventionell) könnten auf diese Weise abgebildet werden. Unberücksichtigt blieb in der vorliegenden Arbeit die detaillierte Betrachtung weiterer Fahrerreaktionen, wie z. B. der indirekten Reaktion auf ein gewarntes Fahrzeug. Die sollte gezielt untersucht werden, um Eingangsdaten für die Modellierung zu erhalten.

Für die Bewertung der Verkehrssicherheit wurde gezeigt, dass die Interpretation von Kenngrößen immer im Untersuchungszusammenhang stattfinden muss. Ob eine Veränderung von Kenngrößen eine positive oder eine negative Wirkung auf die Verkehrssicherheit hat, hängt von den Gegebenheiten der jeweiligen Untersuchungssituation, der Signifikanz der Ergebnisse und auch der Stärke der Ausprägung ab. Führen zwingend notwendige Fahrstreifenwechsel zu Verkleinerungen von Nettozeitlücken, so muss dies nicht unbedingt unsicherer sein. Hier kann eine detailliertere Untersuchung dieser Kenngröße weitere Erkenntnisse ermöglichen.

Zusammenfassend kann von einer Verbesserung für die simulative Wirkungsanalyse von intelligenten Verkehrssystemen durch die detaillierte Nachbildung des individuellen Fahrerhaltens in verkehrssicherheitskritischen Situationen in der Verkehrssimulation ausgegangen werden. Durch die detailliertere Modellierung können vergleichende Sicherheitsanalysen verschiedener Ausstattungsalternativen auf Basis von Ersatzkenngrößen durchgeführt werden. Die Ergebnisse aus realen Fahrversuchen können so z. B. auf beliebige Ausstattungs-raten oder unterschiedliche Übertragungstechnologien skaliert werden. Es kann so u.a. untersucht werden, ab welchen Ausstattungs-raten Wirkungen für den gesamten Verkehr beobachtet werden können. Die Analyse mit Hilfe der Verkehrssimulation stellt damit - gerade für hohe Ausstattungs-raten - eine kosteneffiziente Alternative zu Untersuchungen im realen Umfeld dar.

Die vorliegende Arbeit zeigt exemplarisch für zwei Anwendungsbeispiele und eine begrenzte Datenmenge, dass das entwickelte Vorgehen zur Modellierung des Fahrerhaltens und zur Bewertung hinsichtlich der Verkehrssicherheit grundsätzlich anwendbar ist. Im Rahmen des Projekts sim^{TD} wurde das vorgestellte Vorgehen auf weitere Sicherheitsfunktionen und auch effizienzsteigernde Funktionen, auch im innerörtlichen Bereich, angewendet.

Es ist davon auszugehen, dass mit einer größeren Datenbasis der vorgeschlagene Ansatz weiterhin angewendet werden kann und die Repräsentativität der Ergebnisse verbessert werden könnte. Detaillierte Untersuchungen in der Fahrsimulation bieten den Vorteil, dass weitestgehend identische Situationen von verschiedenen Fahrern durchfahren werden und somit die gewünschten Verteilungen der Fahrerreaktionen als Datenbasis vorhanden sind. Für weiterführende Untersuchungen, mit dem Ziel allgemeingültige Aussagen zum Fahrerhalten zu treffen, wird allerdings empfohlen, Eingangsdaten zu verwenden, die entsprechend der Untersuchungsziele der Verkehrssimulation aufgezeichnet werden. Ein Schwerpunkt sollte dann darauf liegen, identische verkehrliche Randbedingungen zu schaffen. Auch weitere Fahrerreaktionen, wie z. B. die indirekte Reaktion auf ein gewarntes Fahrzeug sollten gezielt untersucht werden, um Eingangsdaten für die Modellierung zu erhalten.

Bisher wurde lediglich das Fahrerhalten von Pkw untersucht, das vorgeschlagene Vorgehen ist auch für andere Verkehrsmittel wie z. B. Lkw, Motorräder oder Fahrräder denkbar. Es könnte somit ein weiteres Spektrum an neuartigen Assistenzsystemen untersucht werden. Ebenso könnte die Betrachtung anderer Straßenkategorien und damit verbunden anderer Geschwindigkeitsniveaus und Fahrstreifenanzahlen erfolgen. Auch die Prüfung der Übertragbarkeit und Verallgemeinerbarkeit des Verhaltens in vergleichbaren Situationen sollte detaillierter untersucht werden, z. B. inwiefern sich die Situationen bei der Umfahrung eines Hindernisses und der Umfahrung einer Baustelle ähneln. Auch wäre zu prüfen, ob eine Modellierung umgesetzt werden könnte, die eine geringere Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsniveau erfordert. Dies könnte durch die Betrachtung relativer Fahrerreaktionen statt wie bisher absoluter Reaktionen erfolgen. Ein weiteres Untersuchungsfeld wäre auch die Analyse, inwiefern das vorgestellte Vorgehen auch bei anderen Fahrermodellen anwendbar ist und wie sich die Ergebnisse evtl. voneinander unterscheiden würden. Bisher wurde das

Wiedemann-Modell verwendet, aber die Anwendung z. B. im Gipps-Modell ist ebenso denkbar.

Neue Technologien ermöglichen eine verbesserte Zugänglichkeit zu realen Fahrerdaten. Werden diese Daten für die detaillierte Modellierung des Fahrerverhaltens und damit für simulative Wirkungsanalysen nutzbar gemacht, könnten diese verbesserten Modelle bei der Entwicklung und Analyse neuer verkehrstechnischer Systeme unterstützen und die Qualität der Aussagen verbessern. Gerade die aktuell erforschten kommunikationsbasierten Assistenzsysteme erfordern weitreichende (nicht mehr örtlich beschränkte) Investitionsentscheidungen. Diese können durch eine verbesserte Modellierung und Bewertung des Fahrerverhaltens unterstützt werden.

6 Literaturverzeichnis

AMUNDSEN, F.; HYDEN, C. [1977]: Proceedings of first workshop on traffic conflicts, Oslo, Institute of Transport Economics.

ARCHER, J. [2005]: Indicators for traffic safety assessment and prediction and their application in micro-simulation modelling. A study of urban and suburban intersections. Dissertation. Stockholm, online verfügbar unter http://www.infra.kth.se/ctr/publications/ctr2004_15.pdf, zuletzt geprüft am 10.04.2013.

ARCHER, J., [2000]: Developing the potential of microsimulation modeling for traffic safety assessment. Proceedings of 13th Annual International Cooperation on Theories and Concepts on Traffic Safety Workshop. Corfu, Greece; 2000.

ASSENMACHER, S.; BUSCH F. [2007]: DIWA Unfalluntersuchung, Projektbericht BMW, München, 2007.

BARCELÓ, J.; DUMONT, A.-G.; MONTERO, L.; PERARNAU, J.; TORDAY, A. [2002]: Safety Indicators for Microsimulationbased Assessments, TRB 2003 Annual Meeting CD-ROM. Transportation Research Board 2003 Annual Meeting January 2003 Washington, D.C. Online verfügbar unter: http://www.ltrc.lsu.edu/TRB_82/TRB2003-001125.pdf, zuletzt geprüft am 10.04.2013.

BAST [2007]: Massen- und Serienunfälle auf Autobahnen, <http://www.bast.de>, zuletzt geprüft am 10.04.2013.

BAUR, M.; HOFFMANN, S. [2013] simTD Ergebnisse Verkehrssimulation, Working Document W43.3. 2013, projektinterne Berichte zu den Anwendungsfällen in der Verkehrssimulation, 2013.

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT [2010]: Was versteht man unter Gefahren? http://www.lfu.bayern.de/geologie/massenbewegungen/definition_gefahren/index.htm, zuletzt geprüft am 10.04.2013.

BEHRISCH, M.; BIEKER, L.; ERDMANN, J.; KRAJZEWICZ, D. [2011]: SUMO – Simulation of Urban MObility. An Overview. The Third International Conference on Advances System Simulation, 2011.

BENDA, H V.; HOYOS, C-G. [1983]: Estimating hazards in traffic situations. In: Accident Analysis & Prevention 15 (1), S. 1–9.

BENMIMOUN, A. [2004]: Der Fahrer als Vorbild für Fahrerassistenzsysteme? Ein Fahrermodellbasierter Ansatz zur Entwicklung von situationsadaptiven FAS. Hg. v. 13. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik 2004. Online verfügbar unter

http://www.pelops.de/pdf/2004/4bn0069_ac_koll_manuskript.pdf, zuletzt aktualisiert am 24.11.2004, zuletzt geprüft am 07.04.2009.

BEVRANI, K.; CHUNG, E. [2011]: Car Following Model Improvement for Traffic Safety Metrics Reproduction. Australasian Transport Research Forum 2011 Proceedings. Adelaide, Australia, 28.09.2011.

BRACKSTONE, M.; SULTAN, B.; MCDONALD, M. [2002]: Motorway driver behaviour: studies on car following. In: Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour 5 (1), S. 31–46.

BREUER, K.; CHRISTEN, F. [2002]: Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen unter Verwendung von SIL- und HIL-Techniken im Verkehrsflusssimulationsprogramm PELOPS, 15.08.2002. Online verfügbar unter http://www.pelops.de/pdf/2002/entwicklung_von_fahrerassistenzsystemen_unter_verwendung_von_sil-_und_hil-techniken_in_pelops.pdf, zuletzt geprüft am 05.01.2010.

BRIEST, S. [2006]: In welchen Situationen machen Fahrer welche Fehler? Ableitung von Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme durch In-Depth-Unfallanalysen. Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme. VDI Verlag GmbH. Wolfsburg, 12.10.2006.

BUSCH, S. [2005]: Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur Prognose des Sicherheitsgewinns ausgewählter Fahrerassistenzsysteme. Dissertation, Techn. Univ. Dresden, 2004. Düsseldorf: VDI-Verl. (Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik, 588).

CACCIABUE, P. C. [2011]: Human modelling in assisted transportation. Models, tools and risk methods. 1. Aufl. New York: Springer.

CACCIABUE, P. C.; MARTINETTO, M. [2006]: A user-centred approach for designing driving support systems: the case of collision avoidance. In: Cognition, Technology & Work, Springer London, Number 3 (Volume 8), S. 201–214.

CUNTO, F.; SACCOMANNO, F. [2007]: Evaluation of safety countermeasures at intersections using microscopic simulation. In: Rev. Tecnol. Fortaleza (jun. 2007), S. p. 111-120.

DAGANZO, C. F. [2002]: A behavioral theory of multi-lane traffic flow. Part I: Long homogeneous freeway sections. In: Transportation Research Part B: Methodological, 36 (2), S. 131–158.

DEBUS, G.; HELLER, D.; WILL, M.; DÜTSCHKE, E.; NORMANN, M.; PLACKE, L. [2005]: Risikoanalyse von Massenunfällen bei Nebel, BAST-Bericht M 169, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch-Gladbach, 2005.

DETERING, S. [2011]: Kalibrierung und Validierung von Verkehrssimulationsmodellen zur Untersuchung von Verkehrsassistenzsystemen. Dissertation. Braunschweig.

DILLING, J. [1973]: Fahrverhalten von Kraftfahrzeugen auf kurvigen Strecken In: Straßenbau und Verkehrstechnik, Heft 151, 1973

EHMANN, D. [2003]: Modellierung des taktischen Fahrerverhaltens bei Spurwechsellvorgängen. Dissertation. Aachen.

FASTENMEIER, WOLFGANG [1994]: Verkehrstechnische und verhaltensbezogene Merkmale von Fahrstrecken - Entwicklung und Erprobung einer Typologie von Straßenverkehrssituationen. Dissertation. München: Technische Universität München, Lehrstuhl für Psychologie.

FASTENMEIER, WOLFGANG [1995]: Autofahrer und Verkehrssituation. Neue Wege zur Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit moderner Straßenverkehrssysteme. Köln: Verlag TÜV Rheinland.

FECHER, NORBERT [2005]: Analyse des stationären Folgeverhaltens von Pkw-Fahrerführern unter Berücksichtigung von Nässe und einhergehender Sichtbehinderung. Techn. Univ., Diss.--Darmstadt, 2005. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl. (Berichte aus dem Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, 604). Online verfügbar unter <http://elib.tu-darmstadt.de/diss/000908>; zuletzt geprüft am 10.04.2013.

FELLENDORF, M.; VORTISCH, P. [2001]: Validation of the microscopic traffic model VISSIM in different real-world situations. Transportation Research Board (TRB). WASHINGTON, D.C. (Proceedings of 80th TRB Meeting).

FENK, J.; PRAXENTHALER, M. [1998]: Einfluss einer mehrstufigen Bremsanzeige auf das Fahrerverhalten. In: 7. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 5.-7. Oktober 1998, S. 1237-49.

FGSV: FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßENVERKEHR [2006]: Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation. Grundlagen und Anwendung. 2006. Aufl. Köln: FGSV-Verl.

FHWA: FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (HG.) [2004]: Traffic Analysis Toolbox. Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Software. Unter Mitarbeit von Alexander Skabardonis Vassili Alexiadis Richard Dowling. Washington, D.C. (FHWA-HRT-04-040). Online verfügbar unter http://ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysistools/tat_vol3/vol3_guidelines.pdf, zuletzt geprüft am 10.04.2013.

FILZEK, B. [2003]: Abstandsverhalten auf Autobahnen - Fahrer und ACC im Vergleich. Techn. Univ., Diss.--Darmstadt. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl. (Berichte aus dem Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, 536).

FRITZSCHE, H.T [1994]: A Model for Traffic Simulation. In: Traffic Engineering and Control, S. 317-321.

GETTMAN, D.; HEAD, L. [2003]: Surrogate Safety Measures From Traffic Simulation Models. Final Report. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration (FHWA-RD-03-050).

GIPPS, P. G. [1981]: A behavioural car-following model for computer simulation. In: Transportation Research Part B: Methodological 15 (2), S. 105–111. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0191261581900370>.

GIPPS, P. G. [1986]: A model for the structure of lane-changing decisions. In: Transportation Research Part B: Methodological 20 (5), S. 403–414. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0191261586900123>.

GLASER, W.; WASCHULEWSKI, H. [2005]: Validierung und Weiterentwicklung des Bewertungsverfahrens I-TSA (Invent – Traffic Safety Assessment). INVENT – Forschungsprojekt Fahrerassistenzsysteme (FAS), Teilprojekt Fahrerverhalten und Mensch-Maschine-Interaktion (FVM), Arbeitspaket 3200, Abschlussbericht. Tübingen. Online verfügbar unter <http://homepages.uni-tuebingen.de/wilhelm.glaser/BeriExp08.pdf>, zuletzt aktualisiert am 2005, zuletzt geprüft am 08.01.2010.

GRÜNDL, M. [2005]: Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Vermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen. Dissertationsschrift, Universität Regensburg, Online verfügbar unter: http://epub.uni-regensburg.de/10345/1/diss_gruendl.pdf.

HACKER, W. [1998]: Nur indirekt zitiert, Allgemeine Arbeitspsychologie. Bern: Verlag Hans Huber.

HARDING, J. [2007]: Modellierung und mikroskopische Simulation des Autobahnverkehrs. Dissertation, Bochum. Online verfügbar unter <http://www-brs.ub.ruhr-uni-bochum.de/netahtml/HSS/Diss/HardingJochen/diss.pdf>, zuletzt geprüft am 28.12.2009.

HELL, W. [2004]: Unfallursache „Einschlafen“ - Auftreten und Prävention von Müdigkeitsunfällen im Straßenverkehr, Vortrag auf dem 42. Deutschen Verkehrsgerichtstag AK II am 30.01.2004 in Goslar.

HIDAS, P. [2005]: Modelling Individual Behaviour In Microsimulation Models. University of New South Wales, Sydney, NSW, Australia. 28th Australasian Transport Research Forum. Online verfügbar unter http://www.atrf.info/papers/2005/2005_Hidas.pdf, zuletzt geprüft am 19.10.2012.

HOCHSTÄDTER, A.; ZAHN, P.; BREUER, K. [2000]: Ein universelles Fahrermodell mit den Einsatzbeispielen Verkehrssimulation und Fahrsimulation. Online verfügbar unter http://www.pelops.de/pdf/ACKolloquium2000_1.pdf, zuletzt geprüft am 07.04.2009.

HOOGENDOORN, S. P.; BOVY, P. H. L. [2001]: State-of-the-art of vehicular traffic flow modeling. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering 215 (4), S. 283–303.

JANSSEN, J.; LAATZ, W. [2007]: Statistische Datenanalyse mit SPSS für Windows. Eine anwendungsorientierte Einführung in das Basissystem und das Modul exakte Tests ; mit 193 Tabellen. 6. Aufl. Berlin [u. a.]: Springer.

JÜRGENSOHN, T. [2009]: Fahrermodellierung in Wissenschaft und Wirtschaft. 2. Berliner Fachtagung Fahrermodellierung, 19. - 20. Juni 2008. Als. Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 22, Mensch-Maschine-Systeme, 28.

KILLAT, M. ; SCHMIDT-EISENLOHR, F.; HARTENSTEIN , H.; RÖSSEL, C.; VORTISCH, P.; ASSENMACHER, S.; BUSCH, F. [2007]: Enabling efficient and accurate large-scale simulations of VANETS for vehicular traffic management, In Proceedings of the fourth ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET), pp. 29-38, Montreal, Quebec, Canada, September 2007.

KLEBELSBERG, D. [1982]: Verkehrspsychologie. Berlin, Heidelberg [etc.]: Springer.

KRAJZEWICZ, D. [2010]: Traffic Simulation with SUMO – Simulation of Urban Mobility. Fundamentals of Traffic Simulation. In: Jaime Barceló (Hg.), Bd. 145: Springer New York, International Series in Operations Research & Management Science, S. 269–293.

KRAJZEWICZ, D.; HERTKORN, G.; RÖSSEL, C.; WAGNER, P. [2002]: SUMO (Simulation of Urban MObility) - an open-source traffic simulation. ISBN 90-77039-09-0. In: Proceedings of the 4th Middle East Symposium on Simulation and Modelling, Sharjah (United Arab Emirates), S. 183–187.

KRAUß, S. [1998]: Microscopic modeling of traffic flow. Investigation of collision free vehicle dynamics. Dissertation. Köln: DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: Forschungsbericht, 1998,8).

LUNDGREN, J.; TAPANI, A. [2006]: Evaluation of Safety Effects of Driver Assistance Systems Through Traffic Simulation. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2006 (1953), S. 81–88.

MICHON, J. A. [1985]: A critical view of driver behaviour models: What do we know, what should we do? In: Human behavior and traffic safety 1985, S. 485–520.

MINDERHOUD, M. M.; BOVY, P. H. L. [2001]: Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment. In: Accident Analysis & Prevention 33 (1), S. 89–97.

MITSIMLAB [2012]: <http://mit.edu/its/mitsimlab.htm>.

NAGEL, K.; SCHRECKENBERG, M. [1992]: „A cellular automaton model for freeway traffic“, J. Phys. I France 2 (1992) 2221–2229.

OECD [1997]: Road Safety Principles and Models: Review of Descriptive, Predictive, Risk and Accident Consequence Models, OECD Road Transport Research, Paris.

PARAMICS [2012]: <http://www.paramics-online.com/>.

PÖPPEL-DECKER, M., SCHEPERS A., KOßMANN, I. [2003]: Grundlagen streckenbezogener Unfallanalysen auf Bundesautobahnen, BAST-Bericht M 153, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch-Gladbach, 2003.

PTV PLANUNG TRANSPORT VERKEHR AG [2012]: VISSIM 5.40-03 - Benutzerhandbuch. Karlsruhe (ptv vision).

RASMUSSEN, J. [1982]: Human errors. A taxonomy for describing human malfunction in industrial installations. In: Journal of Occupational Accidents 4 (2–4), S. 311–333. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0376634982900414>.

REICHART, GÜNTER [2001]: Menschliche Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen. Dissertation. Düsseldorf: VDI-Verl. (Fortschritt-Berichte / VDI Reihe 22, Mensch-Maschine-Systeme, Nr. 7).

RISSER, R. [1985]: Behavior in traffic conflict situations, Accident Analysis and Prevention, Vol. 17:2, pp. 179-197.

ROBATSCH, K. [2003]: Einfluss der Witterung auf das Unfallgeschehen, Kuratorium für Verkehrssicherheit, www.oeamtc.at, Stand 01.09.2007.

RUMAR, K. [1986]: The Role of Perceptual and Cognitive Filters in Observed Behavior. In: Leonard Evans und Richard C Schwing (Hg.): Human Behavior and Traffic Safety: Springer US, S. 151–170.

RUMAR, K. [1990]: Driver requirements and road traffic informatics. In: *Transportation* 17 (3), S. 215–229.

RUMAR, K. [2004]: Traffic Safety Assessment. In: Editor-in-Chief: Charles Spielberger (Hg.): Encyclopedia of Applied Psychology. New York: Elsevier, S. 557–562. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0126574103005237>.

SACHS, L. [1999]: Angewandte Statistik. Anwendung statistischer Methoden; 9. Aufl. Berlin [u. a.]: Springer.

SCHIMMELPFENNIG, K.-H.; NACKENHORST, U. [1985]: Bedeutung der Querbeschleunigung in der Verkehrsunfallrekonstruktion. Sicherheitsgrenze des Normalfahrers. In: Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 1985, S. 94–96.

SCHNEIDER, J. H. (2010): Modellierung und Erkennung von Fahrsituationen und Fahrmanövern für sicherheitsrelevante Fahrerassistenzsysteme. Dissertation. Chemnitz: Univ.-Verl.

SCHNITTGER, S. [1991]: Einfluss von Sicherheitsanforderungen auf die Leistungsfähigkeit von Schnellstraßen. Dissertation am Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe Schriftenreihe, Heft 45/91.

SIMTD D11.1 [2009]: Beschreibung_der_C2X_Funktionen, Deliverable 11.1, 2009, online verfügbar unter: www.simTD.de, zuletzt geprüft am 20.04.2013.

SIMTD D13.2 [2009]: Test und Versuchsspezifikation, Deliverable 13.2; online verfügbar unter: www.simTD.de, zuletzt geprüft am 20.04.2013.

SIMTD D41.1 [2010]: Versuchsplan, Deliverable 41.1, 2010, online verfügbar unter: www.simTD.de, zuletzt geprüft am 20.04.2013.

SIMTD W41.3 [2013]: Working Documents zur Beschreibung und Auswertung der Anwendungsfälle in der Fahrsimulation, interne Projektberichte, 2013.

SPANGLER, M. [2009]: Reisezeitbasierte Verfahren für die Verkehrszustandsanalyse von städtischen Hauptverkehrsstrassen. München: Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Techn. Univ.

SPARMANN, U. [1978]: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Bd.263: Spurwechsellvorgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen. Bundesminister für Verkehr, Abteilung Strassenbau, 1978.

SPSS [2012]: IBM SPSS, Release 20.0.0

STATISTISCHES BUNDESAMT [2011]: Verkehrsunfälle 2010. Fachserie 8 Reihe 7. Artikelnummer: 2080700107004. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.

STEINHOFF, C. [2003]: Online-Bewertung der Akzeptanz und der Wirksamkeit präventiver Maßnahmen durch Streckenbeeinflussungsanlagen auf Autobahnen. München: Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Techn. Univ.

SUMO [2013]: <http://sumo.sourceforge.net/>

TREAT, J. R., TUMBAS, N. S., McDONALD, S. T., SHINAR, D., HUME, R. D., MAYER, R. E., STANISFER, R. L. AND CASTELLAN, N. J. [1977] Tri-level study of the causes of traffic accidents. Report No. DOT-HS-034-3-535-77 (TAC).

TSS TRANSPORT SIMULATION SYSTEMS [2011]: Aimsun 6.1 User's Manual, Barcelona, 2011.

VAN DER HORST, R.; HOGEMA, J. [1993]: Time to collision and collision avoidance systems. Proceedings of the 6th ICTCT Workshop (pp. 291-296). Salzburg: Austrian Road Safety Board.

WIEDEMANN, R. [1974]: Simulation des Straßenverkehrsflusses, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 8.

WINNER, HERMANN; HAKULI, STEPHAN; WOLF, GABRIELE [2009]: HANDBUCH Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort ;. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

Abkürzungsverzeichnis

a	Beschleunigung
DAB	Digital Audio Broadcast
Dist	Distanz
DR	Deceleration Rate
ET	Encroachment Time
FAS	Fahrerassistenzsystem
FS	Fahrstreifen
FSIM	Fahrsimulation
Fz	Fahrzeug
Fzg	Fahrzeug
h	Stunde
IAPT	Initially Attempted Post Encroachment Time
ITS	Intelligentes Transport System
k	Verkehrsdichte
km	Kilometer
krit	kritisch
LSA	Lichtsignalanlage
LKW	Lastkraftwagen
MMS	Mensch-Maschine-System
PET	Post Encroachment Time
PKW	Personenkraftwagen
Pos	Position
q	Verkehrsstärke
QS	Querschnitt
R	Regler
RS	Regelstrecke
SBA	Streckenbeeinflussungsanlage
SDLP	Standard Deviation of Lateral Position
sim ^{TD}	Sichere intelligente Mobilität Testfeld Deutschland
Sit	Situation
TED	Time-Exposed-Critical-Deceleration
TET	Time Exposed-Critical TTC
TETH	Time Exposed-Critical THW
TEV	Time Exposed-Critical Velocity
THW	Time Headway (Nettozeitlücke)
TID	Time-Integrated-Critical-Deceleration
TIT	Time Integrated TTC
TITH	Time Integrated-Critical THW
TIV	Time Integrated-Critical Velocity
TLC	Time-to-Line Crossing

TTA	Time-To-Accident
TTC	Time-To-Collision
v	Geschwindigkeit
VSIM	Verkehrssimulation
W	Führungsgröße

Abbildungsverzeichnis

Bild 1-1:	Überblick über die Struktur der vorliegenden Arbeit und Darstellung der Fragestellungen der einzelnen Abschnitte	5
Bild 2-1:	Situations-Aktions Modell nach Büschges et al., 1972 [zitiert nach WIEDEMANN 1974, S. 9]	7
Bild 2-2:	Relationale Darstellung der verwendeten Begriffe zur Beschreibung von Verkehrssicherheit und -unsicherheit	10
Bild 2-3:	Unbeeinflusstes und beeinflusstes Fahren, Darstellung nach WIEDEMANN [1974], und eigene Erweiterung um den Aspekt der verkehrssicherheitskritischen Situation (gestrichelt)	11
Bild 2-4:	Darstellung unterschiedlicher Situationsbegriffe im räumlichen und relationalen Kontext für die Definitionen in der vorliegenden Arbeit.....	13
Bild 2-5:	Beschreibung des Zusammenspiels von Fahrer, Fahrzeug, ITS und Umfeld.....	20
Bild 2-6:	Relationen aus Fahrermodell, Fahrfehler und Unfallentstehung als Auszug aus [GLASER & WASCHULEWSKI 2005]	24
Bild 2-7:	Pyramidendarstellung der Ereignishäufigkeiten von verkehrssicherheitskritischen Ereignissen in Relationen zu normalen, sicheren Fahrtzuständen nach Hydén, zitiert nach [ARCHER, 2005]	25
Bild 2-8:	Darstellung der Einsatzbereiche von Kenngrößen als Eingangsgrößen, Stellgrößen, Ausgabegrößen und Qualitätsgrößen für die Modellierung.....	27
Bild 2-9:	Zeit-Weg-Darstellung von mehreren Fahrzeugtrajektorien und mögliche Aggregierungsstufen für die Wirkungsanalyse von kontinuierlich erhobenen mikroskopischen Kenngrößen	29
Bild 2-10:	Allgemeine Darstellung möglicher charakteristische Werte für die Kenngrößenermittlung bei zeitlich-räumlich kontinuierlich vorhandenen Messgrößen	30
Bild 2-11:	Time-To-Collision und die daraus abgeleiteten Kenngrößen TET und TIT in Anlehnung an [MINDERHOUD & BOVY, 2001]	30
Bild 2-12:	Beispiel für den zeitlichen oder räumlichen Verlauf der Längsbeschleunigung und deren charakteristischer Werte.....	32
Bild 2-13:	Beispiel für den zeitlichen oder räumlichen Verlauf der Geschwindigkeit und deren charakteristischer Werte	34
Bild 2-14:	Beispiel für die Betrachtung des Verlaufs der Geschwindigkeitsdifferenz dv und den Abstand dx zum Vorderfahrzeug bei einer Folgefahrt.....	36
Bild 2-15:	Aufbau des Abschnitts 2.4 und Einbettung in die Struktur der Arbeit	41
Bild 2-16:	Regelkreis Fahrer - Fahrzeug - Straße bzw. Umfeld nach DILLING [1973]	43
Bild 2-17:	Hierarchische Struktur der Fahraufgaben, eigene Darstellung nach MICHON [1985] ...	44
Bild 2-18:	Hierarchische Struktur der Fahraufgaben, Kombination der Gliederungen nach MICHON 1985 (links) und RASMUSSEN 1982 (rechts)	45
Bild 2-19:	WIEDEMANN [1974]: Abgrenzung der Begriffe beeinflusstes und unbeeinflusstes Fahren	48
Bild 2-20:	Prinzip des Fahrzeugfolgmodells nach Wiedemann 1974 und 1999, vgl. PTV AG [2012]	49
Bild 2-21:	Prinzip des Fahrzeugfolgmodells nach FRITZSCHE [1994]	50
Bild 2-22:	Interaktionen und Schnittstellen zwischen Verkehrssimulation, Kommunikationsmodell und C2X-Anwendung.....	55

Bild 3-1:	Modellierung des stochastischen Fahrerverhaltens vor, während und nach der verkehrssicherheitskritischen Situation.....	59
Bild 3-2:	Fahrsimulatoren in sim ^{TD} (von links nach rechts: Fahrsimulator mit Bewegungssystem, Fahrstand und Pulksimulation) [Quelle: WIVW GmbH]	62
Bild 3-3:	Untersuchungskonzept für die simulative Wirkungsanalyse von ITS und FAS	63
Bild 3-4:	Vorgehensmodell für die Modellierung des Fahrerverhaltens	65
Bild 3-5:	Darstellung verschiedener Möglichkeiten der Fahrverhaltensänderung in Längsrichtung (links) und Querrichtung (rechts)	66
Bild 3-6:	A661: Untersuchungsstrecke in der Verkehrssimulation (links) und in der Realität (mitte) [Quelle: OPENSTREETMAP] sowie die verwendete Verkehrsnachfrage (rechts) am Zufluss Z1	69
Bild 3-7:	Vorgehen und Festlegungen für die Durchführung der simulativen Wirkungsanalyse der Funktion „Warnung vor der Baustelle“	70
Bild 3-8:	Annahmen und Vorgehensmodell für die Modellierung einer Fahrerreaktion auf eine Fahrstreifenreduktion durch eine Wanderbaustelle	72
Bild 3-9:	Annahmen und Vorgehensmodell für die Modellierung einer Fahrerreaktion auf eine Annäherung an ein Stauende	73
Bild 3-10:	Untersuchungssituationen in der Fahrsimulation, links: Wanderbaustelle, rechts: Stauendewarnung [sim ^{TD} W43.2, 2013].....	74
Bild 3-11:	Baustelle: Verlauf von Geschwindigkeit und Fahrstreifennutzung in Relation zur Strecke für einen Fahrer aus der Fahrsimulation im Vergleich mit FAS und ohne FAS	75
Bild 3-12:	Baustelle: Verlauf der Beschleunigung in Relation zur Strecke für einen Fahrer aus der Fahrsimulation im Vergleich mit FAS und ohne FAS.....	75
Bild 3-13:	Stauende: Geschwindigkeit und Fahrstreifennutzung in Relation zur Strecke für einen Fahrer aus der Fahrsimulation jeweils mit FAS und ohne FAS	76
Bild 3-14:	Minima, Mittelwert und Maxima der Geschwindigkeiten aller Fahrer in Relation zur Strecke aus der Fahrsimulation für die Wanderbaustelle jeweils mit FAS und ohne FAS	77
Bild 3-15:	Erwarteter Normalwert und beobachteter Normalwert für die Reaktion bei der Wanderbaustelle nach der Information auf dem linken Fahrstreifen. Links: der letzte Geschwindigkeitswert und rechts: der minimale Geschwindigkeitswert während der Infophase	80
Bild 3-16:	Mittelwert der Beschleunigung mit und ohne FAS in Relation zur Strecke mit durchschnittlichem Beginn und Ende von Info- und Warnphase für den linken Fahrstreifen	80
Bild 3-17:	Boxplot für die Verteilung der Abstände des Fahrzeugs zur Wanderbaustelle beim Fahrstreifenwechsel mit und ohne FAS	81
Bild 3-18:	Möglichkeiten zur Generierung von Wunschgeschwindigkeitsverteilungen, rot: Summenverteilung direkt aus der Stichprobe, blau: Summenverteilung gemäß geschätzter Normalverteilung	84
Bild 3-19:	Wunschgeschwindigkeitsverteilungen für die Wanderbaustelle bei Anfahrt auf dem gesperrten Fahrstreifen als Summenhäufigkeiten aus Realdaten als Reaktion auf eine Wanderbaustelle für die unterschiedlichen Fahrergruppen und Fahrsituationen - jeweils in Relation zur Ausgangsgeschwindigkeit aller Fahrzeuge (blau, durchgezogen) - ohne FAS (grau, gestrichelt), mit Info (hellrot, gestrichelt) und mit Warnung (dunkelrot)	86

Bild 3-20:	Wunschgeschwindigkeitsverteilungen für die Wanderbaustelle bei Anfahrt auf dem freien Fahrstreifen als Summenhäufigkeiten aus Realdaten als Reaktion auf eine Wanderbaustelle für die unterschiedlichen Fahrergruppen und Fahrsituationen - jeweils in Relation zur Ausgangsgeschwindigkeit aller Fahrzeuge (blau) - ohne FAS (grau), mit Info (hellrot) und mit Warnung (dunkelrot).....	87
Bild 3-21:	Wunschgeschwindigkeitsverteilungen für die Annäherung an ein Stauende als Summenhäufigkeiten aus Realdaten in Relation zur Ausgangsgeschwindigkeit aller Fahrzeuge (blau), mit Info (hellrot) und mit Warnung (dunkelrot)	88
Bild 4-1:	Definition für den Beginn und das Ende des Auswertebereichs	91
Bild 4-2:	Verlauf der mittleren Geschwindigkeiten aller Pkw mit FAS und ohne FAS im Vorfeld der Baustelle im Vergleich zwischen den Basisdaten aus der Fahrsimulation und den Ergebnissen aus der Verkehrssimulation über alle Fahrstreifen.....	95
Bild 4-3:	Relative Häufigkeiten verschiedener Klassen von Nettozeitlücken ohne und mit FAS im Vergleich zwischen den Basisdaten aus der Fahrsimulation (hell) und den Ergebnissen aus der Verkehrssimulation (dunkel) über alle Fahrstreifen; für alle Nettozeitlücken (oben) und für THW < 5 Sekunden (unten)	96
Bild 4-4:	relative Häufigkeiten verschiedener Klassen von Time-To-Collision ohne und mit FAS im Vergleich zwischen den Basisdaten aus der Fahrsimulation (hell) und den Ergebnissen aus der Verkehrssimulation (dunkel) über alle Fahrstreifen, für alle TTC (oben) und für TTC < 10 Sekunden (unten)	98
Bild 4-5:	Exemplarisches Beispiel für die Validierung der Verkehrsnachfrage für das untersuchte Szenario - Vergleich der gemessenen Verkehrsstärke in der Verkehrssimulation mit realen Messwerten an einem exemplarischen Querschnitt, Verkehrszustand „dicht“, vgl. BAUR & HOFFMANN [2013].....	100
Bild 4-6:	Ergebnisse der Regressionsanalyse für den Vergleich der mittleren Geschwindigkeiten ohne FAS (links) mit FAS (rechts) und in der Verkehrssimulation (VSIM = Ordinate) und in der Fahrsimulation (FSIM = Abszisse)	102
Bild 4-7:	Verlauf der Geschwindigkeit über den Ort für die Baustellenwarnung für die Variation der Ausstattungsraten mit FAS von 0, 20, 50 und 80 %	104
Bild 4-8:	Verlauf der Geschwindigkeit über den Ort für die Stauendewarnung für die Variation der Ausstattungsraten mit FAS von 0, 20, 50 und 80 %	105
Bild 4-9:	Vergleich der Verteilungen der mittleren Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten für die Baustellenwarnung (links) und für die Stauendewarnung (rechts) für die Variation der Ausstattungsraten mit FAS von 0, 20, 50 und 80 %.....	105
Bild 4-10:	Vergleich der Verteilungen der minimalen Längsbeschleunigungen für die Baustellenwarnung (links) und für die Stauendewarnung (rechts) für die Variation der Ausstattungsraten mit FAS von 0, 20, 50 und 80 %.....	107
Bild 4-11:	Baustellenwarnung (oben) und Stauendewarnung (unten): Mittelwerte der Time-Exposed-Critical-Deceleration (TED) über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsraten, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“	109
Bild 4-12:	Baustellenwarnung (oben) und Stauendewarnung (unten): Mittelwerte der Time-Integrated-Critical-Deceleration (TID) über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsraten, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“	111
Bild 4-13:	Baustellenwarnung: Anteile der Fahrzeuge, die eine kritische Längsbeschleunigung erfahren, über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsraten, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“	112

Bild 4-14:	Baustellenwarnung: Verhältnisse von TID zu TED im Mittel über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsraten, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“	113
Bild 4-15:	Vergleich der Verteilungen der minimalen Nettozeitlücken für die Baustellenwarnung (links) und für die Stauendwarnung (rechts) für die Variation der Ausstattungsraten mit FAS von 0, 20, 50 und 80 %	114
Bild 4-16:	Baustellenwarnung: Mittelwerte der Time-Exposed-Critical-Time Headway (TETH) für $th < 0,8$ über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsraten, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“	116
Bild 4-17:	Baustellenwarnung: Mittelwerte der Time-Integrated-Critical-Time Headway (TITH) für $th < 0,8$ über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsraten, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“	117
Bild 4-18:	Baustellenwarnung: Anteile der Fahrzeuge, die eine kritische Nettozeitlücke erfahren, über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsraten, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“	118
Bild 4-19:	Baustellenwarnung (links) und Stauendwarnung (rechts) Vergleich der Verteilungen der minimalen TTC für die Variation der Ausstattungsraten mit FAS von 0, 20, 50 und 80 %	119
Bild 4-20:	Baustellenwarnung (oben) und Stauendwarnung (unten): Mittelwerte der Time-Exposed-Critical-TTC (TETTC) für $TTC < 4$ über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsraten, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“	120
Bild 4-21:	Baustellenwarnung (oben) und Stauendwarnung (unten): Mittelwerte der Time-Integrated-Critical-TTC für die Baustellenwarnung und die Stauendwarnung über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsraten, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“	121
Bild 6-1:	Mittelwert der Beschleunigung mit und ohne FAS in Relation zur Strecke für den rechten Fahrstreifen	148
Bild 6-2:	Mittelwert der Beschleunigung mit und ohne FAS in Relation zur Strecke für den linken Fahrstreifen	149
Bild 6-3:	relative Häufigkeiten verschiedener Kritikalitätsklassen von Time-To-Collision mit und ohne FAS im Vergleich zwischen den Basisdaten aus der Fahrsimulation (grün) und den Ergebnissen aus der Verkehrssimulation (türkis) über alle Fahrstreifen	150
Bild 6-4:	Mittelwerte der Time-Exposed-Critical-Time Headway (TETH) für $th < 0,4$ über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsraten, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“	153
Bild 6-5:	Mittelwerte der Time-Integrated-Critical-Time Headway (TITH) für $th < 0,4$ über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsraten, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“	153
Bild 6-6:	Mittelwerte der Time-Exposed-Critical-TTC (TETTC) für $TTC < 2$ über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsraten, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“	154
Bild 6-7:	Mittelwerte der Time-Integrated-Critical-TTC (TETTC) für $TTC < 2$ über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsraten, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“	155

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Überblick über potenzielle Kenngrößen zur Verkehrssicherheit	40
Tabelle 3-1:	Kenngrößen der Eingangsdaten für das Beispiel Baustelle in Längsrichtung je Fahrergruppe	78
Tabelle 3-2:	Ergebnisse für den Test auf Normalverteilung für die charakteristischen Geschwindigkeitswerte auf dem linken Fahrstreifen mit FAS	79
Tabelle 3-3:	Ergebnisse für den Test auf Normalverteilung für die charakteristischen Geschwindigkeitswerte auf dem rechten Fahrstreifen mit FAS.....	79
Tabelle 3-4:	Ergebnisse für die Tests auf Normalverteilung für die Abstände zur Wanderbaustelle beim Fahrstreifenwechsel mit und ohne FAS	82
Tabelle 3-5:	Ergebnisse für die Tests auf Homogenität der Varianzen für die Abstände zur Wanderbaustelle beim Fahrstreifenwechsel mit und ohne FAS.....	82
Tabelle 3-6:	ANOVA für den Einfluss von FAS auf den Abstand beim Fahrstreifenwechsel.....	82
Tabelle 4-1:	Berechnung der notwendigen Anzahl an Simulationsdurchläufen für die Baustellenwarnung für das Beispiel dichter Verkehr und 50 % Ausstattungsrate	93
Tabelle 4-2:	Fehlerquadrate und mittlere Fehler beim Vergleich der Geschwindigkeitsverläufe ohne und mit FAS	99
Tabelle 4-3:	Baustellenwarnung: mittlere Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten pro Ausstattungsrate, Tests auf Normalverteilung der Daten und Signifikanztests zwischen den Ausstattungsratenvarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert)	106
Tabelle 4-4:	Stauendewarnung: minimale Längsbeschleunigung pro Ausstattungsrate, Tests auf Normalverteilung der Daten und Signifikanztests zwischen den Ausstattungsratenvarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert)	108
Tabelle 4-5:	Stauendewarnung: mittlere Expositionsdauer für TED>0 s für Längsbeschleunigungen kleiner $-4,5 \text{ m/s}^2$ pro Ausstattungsrate für alle Fahrzeuge, Signifikanztests zwischen den Ausstattungsratenvarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert)	110
Tabelle 4-6:	Stauendewarnung: mittlere Expositionsstärke für TID > 0 s ² für Längsbeschleunigungen kleiner $-4,5 \text{ m/s}^2$ pro Ausstattungsrate, Signifikanztests zwischen den Ausstattungsratenvarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert)	112
Tabelle 4-7:	Verhältnis von TID/TED für Längsbeschleunigungen kleiner $-4,5 \text{ m/s}^2$ pro Ausstattungsrate, Signifikanztests zwischen den Ausstattungsratenvarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert).....	113
Tabelle 4-8:	Stauendewarnung: minimale Nettozeitlücken pro Ausstattungsrate, Tests auf Normalverteilung der Daten und Signifikanztests zwischen den Ausstattungsratenvarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert)	115
Tabelle 4-9:	Time-Exposed-Critical-Time Headway (TETH) - Signifikanztests zwischen den Ausstattungsratenvarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert)	116
Tabelle 4-10:	Time-Integrated-Critical-Time Headway (TITH) für $th < 0,8$ - Signifikanztests zwischen den Ausstattungsratenvarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert)	117
Tabelle 4-11:	Stauendewarnung: Time-Exposed-Critical-TTC (TETTC) - Signifikanztests zwischen den Ausstattungsratenvarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert)	121
Tabelle 4-12:	Baustellenwarnung: Time-Exposed-Critical-Time Headway (TITTC) - Signifikanztests zwischen den Ausstattungsratenvarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert)	122

Tabelle 6-1:	Ergebnisse für den Test auf Normalverteilung für die charakteristischen Geschwindigkeitswerte auf dem linken Fahrstreifen mit FAS	147
Tabelle 6-2:	Ergebnisse für den Test auf Normalverteilung für die charakteristischen Geschwindigkeitswerte auf dem rechten Fahrstreifen mit FAS	147
Tabelle 6-3:	Anzahl benötigter Simulationsläufe für Szenario, dichter Verkehr, 0 % Ausstattungsrate	149
Tabelle 6-4:	Anzahl benötigter Simulationsläufe für Szenario dichter Verkehr, 20 % Ausstattungsrate	149
Tabelle 6-5:	Anzahl benötigter Simulationsläufe für Szenario dichter Verkehr, 50 % Ausstattungsrate	150
Tabelle 6-6:	Anzahl benötigter Simulationsläufe für Szenario dichter Verkehr, 80 % Ausstattungsrate	150
Tabelle 6-7:	Baustellenwarnung: mittlere Expositionsdauer für $TED > 0$ s für Längsbeschleunigungen kleiner $-4,5 \text{ m/s}^2$ pro Ausstattungsrate für alle Fahrzeuge, Signifikanztests zwischen den Ausstattungsratenvarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert).....	151
Tabelle 6-8:	Baustellenwarnung: mittlere Expositionsstärke für $TID > 0 \text{ s}^2$ für Längsbeschleunigungen kleiner $-4,5 \text{ m/s}^2$ pro Ausstattungsrate, Signifikanztests zwischen den Ausstattungsratenvarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert)	151
Tabelle 6-9:	Baustellenwarnung: minimale Nettozeitlücken pro Ausstattungsrate, Tests auf Normalverteilung der Daten und Signifikanztests zwischen den Ausstattungsratenvarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert).....	152
Tabelle 6-10:	Baustellenwarnung: minimale TTC pro Ausstattungsrate, Tests auf Normalverteilung der Daten und Signifikanztests zwischen den Ausstattungsratenvarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert)	152
Tabelle 6-11:	Time-Exposed-Critical-TTC (TETTC) - Signifikanztests zwischen den Ausstattungsratenvarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert).....	154

Anhang

Anhang I. Prüfung der Verteilungen der Eingangsdaten

Anhang I.a. Charakteristische Werte des Längsverhaltens

Anhang I.a.1. Mit FAS

Tabelle 6-1: Ergebnisse für den Test auf Normalverteilung für die charakteristischen Geschwindigkeitswerte auf dem linken Fahrstreifen mit FAS

Tests auf Normalverteilung						
Linker Fahrstreifen mit FAS Geschwindigkeiten	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
Minimum	,211	14	,092	,888	14	,076
bei Ereignis	,156	14	,200*	,961	14	,737
Info Letzter Wert	,321	14	,000	,797	14	,005
Info Minimum	,324	14	,000	,774	14	,002
Warnung Letzter Wert	,182	14	,200*	,926	14	,265
Warnung Minimum	,208	14	,101	,888	14	,076

*. Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

Tabelle 6-2: Ergebnisse für den Test auf Normalverteilung für die charakteristischen Geschwindigkeitswerte auf dem rechten Fahrstreifen mit FAS

Tests auf Normalverteilung						
Rechter Fahrstreifen mit FAS, Geschwindigkeiten	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
Minimum	,295	6	,112	,821	6	,091
Info Letzter Wert	,226	6	,200*	,833	6	,113
Info Minimum	,229	6	,200*	,848	6	,150
Warnung Letzter Wert	,274	6	,180	,876	6	,251
Warnung Minimum	,283	6	,144	,831	6	,109

*. Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

Anhang I.a.2. Ohne FAS

Tests auf Normalverteilung						
Rechts ohne FAS	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
Minimum	,385	7	,002	,622	7	,000

a. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors

Tests auf Normalverteilung						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
Minimum	,188	8	,200*	,917	8	,404
bei Ereignis	,209	8	,200*	,912	8	,366

*. Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

a. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors

Anhang I.b.Ort Reaktionsbeginn - Längsrichtung

Anhang I.b.1. Rechter Fahrstreifen

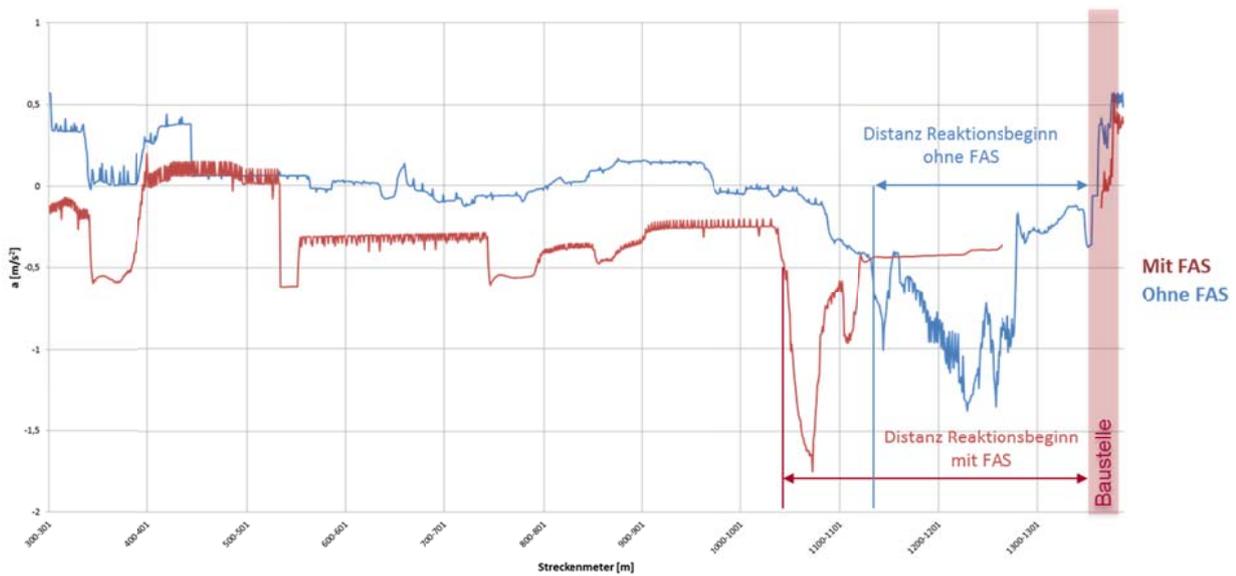


Bild 6-1: Mittelwert der Beschleunigung mit und ohne FAS in Relation zur Strecke für den rechten Fahrstreifen

Anhang I.b.2. Linker Fahrstreifen

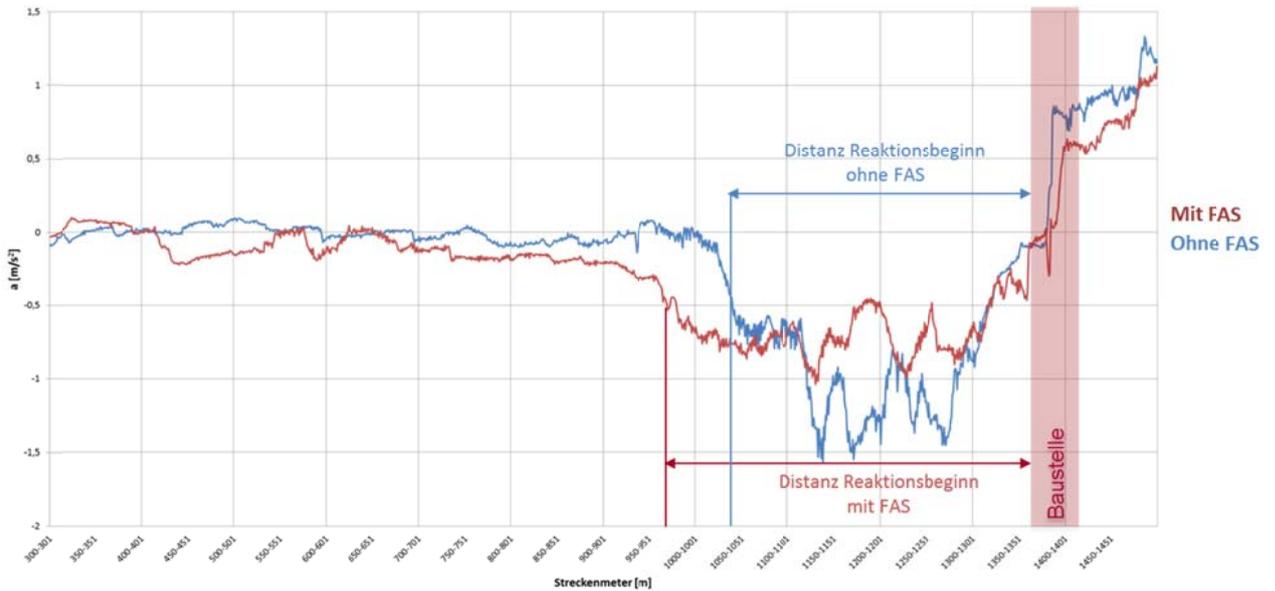


Bild 6-2: Mittelwert der Beschleunigung mit und ohne FAS in Relation zur Strecke für den linken Fahrstreifen

Anhang II. Wirkungsanalyse und Bewertung

Anhang II.a. Notwendige Anzahl an Simulationsdurchläufen

Tabelle 6-3: Anzahl benötigter Simulationsläufe für Szenario, dichter Verkehr, 0 % Ausstattungsrate

Kenngröße	Mittelwert	Standardabweichung	KI, berechnet aus initialen Durchläufen mit Standardfehler	erreichbares KI	Anzahl notwendiger Simulationen
$V_{mittel_Fzg} [km/h]$	130,68	2,21	4,21	1,71	5
$V_{mittel_QS} [km/h]$	93,35	4,85	9,26	3,76	5
$th_{mittel} [s]$	2,66	0,06	0,11	0,01	5

Tabelle 6-4: Anzahl benötigter Simulationsläufe für Szenario dichter Verkehr, 20 % Ausstattungsrate

Kenngröße	Mittelwert	Standardabweichung	KI, berechnet aus initialen Durchläufen mit Standardfehler	erreichbares KI	Anzahl notwendiger Simulationen
$V_{mittel_Fzg} [km/h]$	125,97	3,57	6,81	2,81	5
$V_{mittel_QS} [km/h]$	81,34	5,74	10,95	4,55	5
$th_{mittel} [s]$	2,62	0,07	0,14	0,04	5

Tabelle 6-5: Anzahl benötigter Simulationsläufe für Szenario dichter Verkehr, 50 % Ausstattungsrate

Kenngröße	Mittelwert	Standardabweichung	KI, berechnet aus initialen Durchläufen mit Standardfehler	erreichbares KI	Anzahl notwendiger Simulationen
$V_{mittel_Fzg} [km/h]$	121,46	6,88	13,13	5,43	5
$V_{mittel_QS} [km/h]$	67,79	12,80	24,40	10,10	5
$th_{mittel} [s]$	2,54	0,08	0,15	0,05	5

Tabelle 6-6: Anzahl benötigter Simulationsläufe für Szenario dichter Verkehr, 80 % Ausstattungsrate

Kenngröße	Mittelwert	Standardabweichung	KI, berechnet aus initialen Durchläufen mit Standardfehler	erreichbares KI	Anzahl notwendiger Simulationen
$V_{mittel_Fzg} [km/h]$	118,30	7,24	13,80	5,70	5
$V_{mittel_QS} [km/h]$	51,35	29,84	56,90	23,60	5
$th_{mittel} [s]$	2,43	0,13	0,24	0,04	5

Anhang II.b. Validierung des Fahrerverhaltens

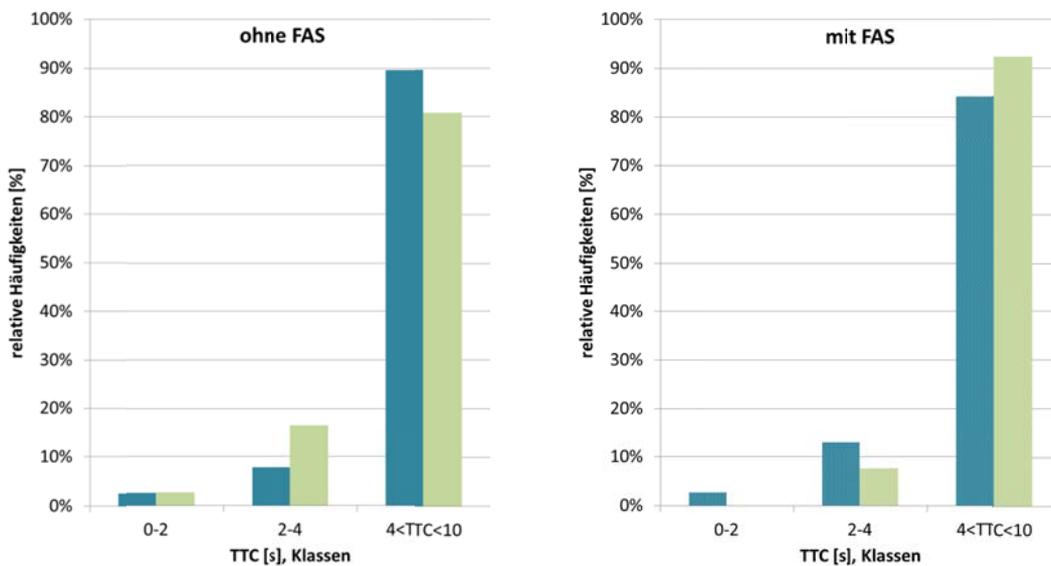


Bild 6-3: relative Häufigkeiten verschiedener Kritikalitätsklassen von Time-To-Collision mit und ohne FAS im Vergleich zwischen den Basisdaten aus der Fahrsimulation (grün) und den Ergebnissen aus der Verkehrssimulation (türkis) über alle Fahrstreifen

Anhang II.c. Wirkungsanalyse und Bewertung hinsichtlich Verkehrssicherheit

Anhang II.c.1. Time-Exposed-Critical-Deceleration (TED)

Tabelle 6-7: Baustellenwarnung: mittlere Expositionsdauer für TED > 0 s für Längsbeschleunigungen kleiner $-4,5 \text{ m/s}^2$ pro Ausstattungsrate für alle Fahrzeuge, Signifikanztests zwischen den Ausstattungsratenvarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert)

TED	Werte		Ausstattungsrate			
	Mittelwert [s]	Std.abw	0 %	20 %	50 %	80 %
0 %	0,60	1,11		d = -0,03 -5,65 % p = 0,547	d = -0,00 -0,05 % p = 1,000	d = -0,01 -1,22 % p = 0,992
20 %	0,57	1,04			d = 0,03 5,94 % p = 0,553	d = 0,03 4,70 % p = 0,726
50 %	0,60	1,04				d = -0,01 -1,17 % p = 0,993
80 %	0,60	1,05				

Anhang II.c.2. Time-Integrated-Critical-Deceleration (TID)

Tabelle 6-8: Baustellenwarnung: mittlere Expositionsstärke für TID > 0 s^2 für Längsbeschleunigungen kleiner $-4,5 \text{ m/s}^2$ pro Ausstattungsrate, Signifikanztests zwischen den Ausstattungsratenvarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert)

TID	Werte		Ausstattungsrate			
	Mittelwert [s^2]	Std.abw	0 %	20 %	50 %	80 %
0 %	0,75	1,61		d = -0,05 -7,22 % p = 0,474	d = -0,00 -0,49 % p = 1,000	d = 0,00 0,58 % p = 0,999
20 %	0,70	1,49			d = 0,05 7,25 % p = 0,535	d = 0,06 8,41 % p = 0,403
50 %	0,75	1,56				d = 0,01 1,08 % p = 0,997
80 %	0,76	1,54				

Anhang II.c.3. Minimale Nettozeitlücken

Tabelle 6-9: Baustellenwarnung: minimale Nettozeitlücken pro Ausstattungsrate, Tests auf Normalverteilung der Daten und Signifikanztests zwischen den Ausstattungsratenvarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert)

minimale Nettozeitlücken						Signifikanztest und Differenzen			
Normalverteilungstest			Werte			Ausstattungsrate			
Ausstattungsrate	p-value	normalverteilt?	Anzahl Fahrzeuge	Mittelwert [s]	Std.abw	0 %	20 %	50 %	80 %
0 %	0,14	ja	3809	1,28	1,17		d = -0,06 -4,32 % p = 0,026 *	d = -0,15 -11,43 % p = 0,000 *	d = -0,19 -14,69 % p = 0,000 *
20 %	0,15	ja	3842	1,23	1,14			d = -0,09 -7,43 % p = 0,000 *	d = -0,13 -10,83 % p = 0,000 *
50 %	0,16	ja	3857	1,14	1,11				d = -0,04 -3,68 % p = 0,006 *
80 %	0,16	ja	3867	1,09	1,12				

Anhang II.c.4. Minimale TTC

Tabelle 6-10: Baustellenwarnung: minimale TTC pro Ausstattungsrate, Tests auf Normalverteilung der Daten und Signifikanztests zwischen den Ausstattungsratenvarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert)

minimale TTC						Signifikanztest und Differenzen			
Normalverteilungstest			Werte			Ausstattungsrate			
Ausstattungsrate	p-value	normalverteilt?	Anzahl Fahrzeuge	Mittelwert [s]	Std.abw	0 %	20 %	50 %	80 %
0 %	0,06	ja	2273	4,62	2,49		d = -0,22 -4,78 % p = 0,003 *	d = -0,41 -8,80 % p = 0,000 *	d = -0,61 -13,27 % p = 0,000 *
20 %	0,08	ja	2499	4,40	2,44			d = -0,19 -4,22 % p = 0,007 *	d = -0,39 -8,92 % p = 0,000 *
50 %	0,08	ja	2738	4,21	2,39				d = -0,21 -4,91 % p = 0,001 *
80 %	0,09	ja	2848	4,01	2,38				

Anhang II.c.5. Time-Exposed-Critical-Time Headway (TETH)

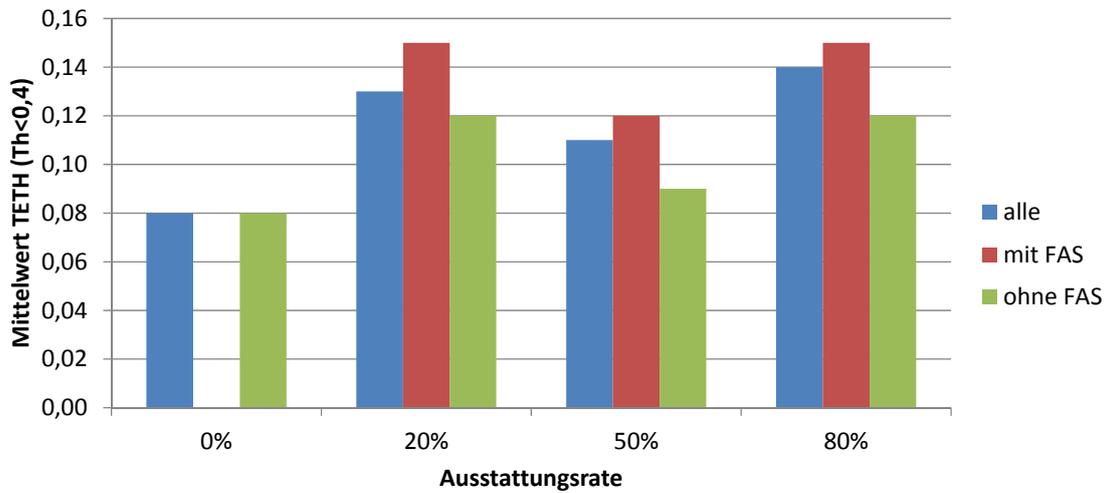


Bild 6-4: Mittelwerte der Time-Exposed-Critical-Time Headway (TETH) für $th < 0,4$ über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsraten, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“

Anhang II.c.6. Time-Integrated-Critical-Time Headway (TITH)

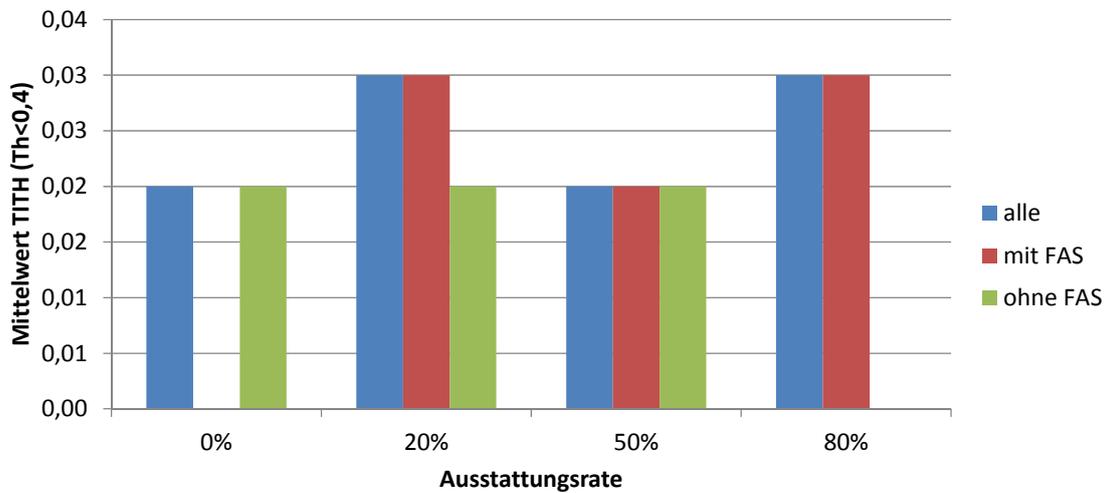


Bild 6-5: Mittelwerte der Time-Integrated-Critical-Time Headway (TITH) für $th < 0,4$ über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsraten, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“

Anhang II.c.7. Time-Exposed-Critical-TTC (TETTC)

Tabelle 6-11: Time-Exposed-Critical-TTC (TETTC) - Signifikanztests zwischen den Ausstattungsra-
tenvarianten (signifikante Ergebnisse sind fett markiert)

TETTC	Werte		Ausstattungsrate			
	Mittelwert [s]	Std.abw	0 %	20 %	50 %	80 %
0 %	0,70	1,64		d = 0,19 27,14 % p = 0,000 *	d = 0,26 37,32 % p = 0,000 *	d = 0,38 54,45 % p = 0,000 *
20 %	0,89	1,84			d = 0,07 8,00 % p = 0,000 *	d = 0,19 21,48 % p = 0,000 *
50 %	0,96	1,77				d = 0,12 12,48 % p = 0,000 *
80 %	1,08	1,80				

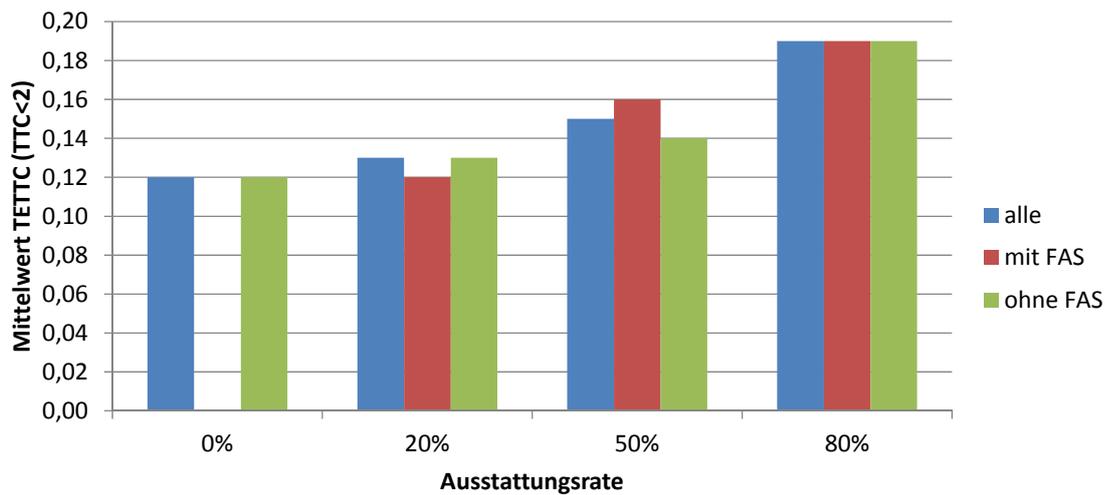


Bild 6-6: Mittelwerte der Time-Exposed-Critical-TTC (TETTC) für TTC < 2 über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsraten, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“

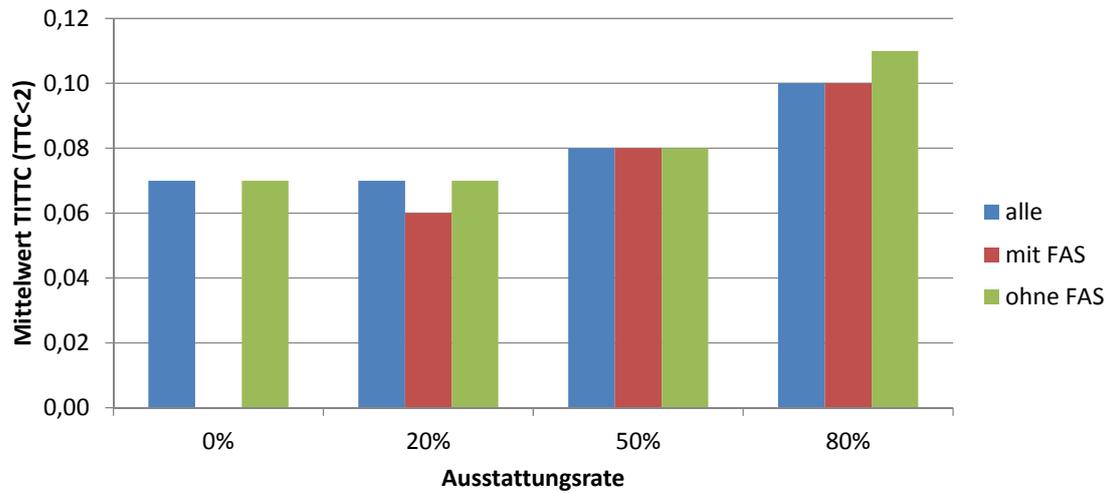
Anhang II.c.8. Time-Integrated-Critical-TTC (TITTC)

Bild 6-7: Mittelwerte der Time-Integrated-Critical-TTC (TETTC) für TTC<2 über alle Fahrzeuge für die Variation der Ausstattungsraten, unterteilt nach „alle“, „mit FAS“ und „ohne FAS“