



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt
Lehrstuhl für Verkehrstechnik

Modellierungsrahmen für Intelligente
Verkehrssysteme zur simulationsbasierten Analyse
ihrer Wirkungen auf den Straßenverkehr

Mathias Christian Baur

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

Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. André Borrmann

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Fritz Busch
2. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Hans-Joachim Bungartz

Die Dissertation wurde am 05.11.2014 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt am 09.03.2015 angenommen.

Kurzfassung

Moderne *Intelligente Verkehrssysteme (IVS)* werden entwickelt, um Streckenkapazitäten oder die Verkehrssicherheit auf Verkehrswegen zu erhöhen. Es handelt sich dabei um eine Vielzahl von verschiedenen Anwendungen und Hardwareeinrichtungen, die an unterschiedlichen Stellen installiert sein können. Neben infrastrukturseitigen Einrichtungen wie Schilderbrücken, statischen und dynamischen Verkehrszeichen oder dynamischen Steuerungsmechanismen wie zum Beispiel adaptiv gesteuerten Lichtsignalanlagen, können dies auch rein fahrzeugbasierte Fahrerassistenzsysteme sein, die eine Wirkung auf den Verkehr anstreben.

Zur Evaluierung tatsächlich möglicher Verkehrswirkungen derartiger Funktionalitäten werden häufig Simulationsmodelle eingesetzt. Dabei wird in verschiedenen Prognoseszenarien untersucht, welche Auswirkungen die Beeinflussung einzelner Fahrzeuge auf aggregierte Kenngrößen des Gesamtverkehrs, wie beispielsweise Fahrzeugabstandsverteilungen oder Durchschnittsgeschwindigkeiten, zeigt.

In derartigen Studien ist es immer notwendig, das zu untersuchende System in geeigneter Weise in die Simulationsumgebung einzubinden. Bisherige Verfahren der Systemmodellierung tendieren meist in eine der beiden Modellextreme: Die naheliegende Einbindung der realen Systemkomponenten mittels *Software-in-the-Loop-* (SiL) oder *Hardware-in-the-Loop-* Kopplung (HiL) mit der Verkehrssimulation gewährleistet den Einsatz der korrekten Funktionalität. Dieses Vorgehen ist jedoch kaum skalierbar, wenn es um die Betrachtung großräumiger Wirkungen auf den Verkehr in großen Straßennetzen mit vielen tausend Fahrzeugen geht. Auf der anderen Seite wird häufig die Simulation zur Abbildung phänomenologischer Einflüsse bestimmter Systemfunktionen statisch parametrisiert. Dies ermöglicht effiziente und skalierbare Simulationen, die eine Wirkungsanalyse für eine große Anzahl an Szenarien großer Ausdehnung ermöglichen. Dabei besteht jedoch die große Gefahr, dass die stark vereinfachte Nachbildung einer eingehenden Validierung nicht standhalten kann. Zur systematischen Auflösung dieses Zielkonflikts wird in dieser Arbeit ein Modellierungsrahmen vorgestellt, der aus zwei Komponenten besteht: Zum einen wurde ein umfassendes, effizientes, modulares und hinsichtlich der zu verwendenden Simulationsumgebung generisches Softwareframework entwickelt. Es stellt wiederverwendbare Komponenten zur Verfügung, in die frei definierbare Systemfunktionen eingebettet werden können, ohne Rücksicht auf spezifische Schnittstellen einzelner Systemsoftwarepakete nehmen zu müssen. Die Komponenten enthalten effiziente Datenstrukturen, die eine skalierbare Anwendung auf viele Fahrzeuge im Simulationsnetz ermöglichen und grundlegende Informationen zu Fahrzeugbewegungen und Verkehrsumfeld in aufbereiteter Form zur Verfügung stel-

len. Außerdem ist damit eine generische Anbindung der entwickelten Systemmodelle an verschiedene Verkehrssimulationswerkzeuge und andere externe Komponenten möglich. Zum anderen wird ein strukturierter Modellierungsprozess für verkehrsbeeinflussende Systemmodelle vorgeschlagen, der relevante Aspekte geläufiger Prozessmodelle im Software-Engineering und etablierte Abläufe aus Untersuchungsstudien im Verkehrswesen miteinander vereint. Das Entwurfparadigma soll dabei von der üblichen funktionalen Spezifikation zu einer modellbasierten Sichtweise übergehen. Zur Ablaufspezifikation wird dabei eine dynamische Beschreibung mittels Zustandsautomaten vorgeschlagen. Wichtige Bestandteile des Modellierungsprozesses sind zudem Systemparametersensitivitätsanalysen, mit denen wesentliche Einflüsse verschiedener spezifischer Systemparameter und -abläufe auf die tatsächlichen Verkehrswirkungen des Systems identifiziert werden können. Die Konfiguration und Ausführung dieser Analysen kann durch das Softwareframework automatisiert werden. Ergebnisse der so definierten Sensitivitätsanalysen können für die vier Modellierungsschritte Komplexitätsreduktion, Systemparameteroptimierung, Modellvalidierung und Wirkungsanalyse im Verkehr genutzt werden. Um dies zu erreichen, werden statt der bislang in Verkehrsuntersuchungen üblichen lokalen Sensitivitätsanalysen angepasste Screeningmethoden vorgeschlagen. Eine Statistikkomponente im Softwareframework dient der vollautomatisierten Analyse und Visualisierung der entsprechenden statistischen Maße. In einer anschließenden Referenzstudie wird ein Systemmodell zu einer Beispielapplikation mithilfe des Softwareframeworks und des strukturierten Modellierungsprozesses spezifiziert und umgesetzt. Zu diesem Zweck wurde das hochautomatisierte kooperative Fahrzeugführungssystem CACC (Cooperative Adaptive Cruise Control), das von der University of Berkeley im Rahmen des PATH-Programms entwickelt wurde, als Referenzapplikation ausgewählt und in ein entsprechendes Systemmodell umgesetzt.

Abschließend wird aus den Erkenntnissen und Ergebnissen der Referenzstudie eine zusammenfassende Bewertung abgeleitet, die den Modellierungsrahmen einer kritischen Prüfung hinsichtlich der Kriterien Zweckmäßigkeit, Nutzbarkeit und Übertragbarkeit auf verschiedene andere Umgebungen und Aspekte unterzieht.

Abstract

Modern *Intelligent Transportation Systems* (ITS) are designed to increase road capacity or safety. It involves a variety of different applications and hardware devices that can be installed at different locations. In addition to infrastructure-side devices such as gantries, static and dynamic traffic signs or dynamic control mechanisms such as adaptively controlled traffic signals, these can also be purely vehicle-based driver assistance systems that aim to have an effect on traffic flow or road safety.

To evaluate potential traffic impacts of such functionalities, simulation models are often used. The impact of the influence of individual vehicles on aggregate indicators of total traffic, such as vehicle distance distributions or average speeds, is examined in different forecast scenarios.

It is always necessary in such studies that the system under study is integrated in an appropriate way into the simulation environment. Previous methods of system modeling tend usually in one of the two extremes of modelling paradigms: The obvious involvement of the real system components using Software-in-the-Loop (SiL) or Hardware-in-the-Loop (HiL) methods ensures that the traffic simulation is using the correct functionality. This approach, however, is hardly scalable when it comes to the consideration of large-scale effects on traffic in bigger road networks with thousands of vehicles. On the other hand, the simulation of phenomenological influences of certain system functions is often parameterized in a static way. This enables efficient and scalable simulations that allow for an impact analysis of a large number of scenarios. However, there is a great risk that the simplified simulation can not withstand a thorough validation.

For systematic resolution of this conflict, a modeling framework is presented in this work, which consists of two components: first, a comprehensive, efficient, modular and - with respect to the simulation environment - generic software framework was developed. It provides reusable components that can be embedded in the user-defined system functions without having to take into account specific interfaces of individual system software packages. The components include efficient data structures that enable a scalable application on many vehicles in the simulation network and provide processed basic information about vehicle movements and traffic environment. Furthermore, a generic connection of the developed system models to different traffic simulation tools and other external components is possible. On the other hand, a structured process for modeling traffic influencing system models is proposed that combines relevant aspects of familiar process models in software engineering and established procedures of investigation studies in transportation. The design paradigm is intended to change from the usual functional specification to a model-based approach.

For flow specification, a dynamic description by means of finite state machines is proposed. Additionally, system parameter sensitivity analyzes are important components of the modeling process. With their help, various system parameters significantly influencing the actual traffic effects of the system can be identified. the software framework can automate the configuration and execution of this analysis. Results of the so-defined sensitivity analyzes can be used for four steps in the modelling process: to reduce complexity, to optimize system parameter values, to perform model validations and impact analyses in a virtual traffic environment. In order to achieve this goal, appropriate screening methods are proposed instead of the usual traffic studies using local sensitivity analyzes. A statistics component is used in the software framework for fully automated analyses and for visualizing the corresponding statistical measures.

In a subsequent study, a reference system model is specified and implemented as a sample application using the software framework and the structured modeling process. For this purpose, the highly automated cooperative vehicle guidance system CACC (Cooperative Adaptive Cruise Control), which was developed by the University of Berkeley in the context of the PATH program, was selected as the reference application and converted into a corresponding system model.

A final assessment is derived from the findings and results of the reference study. It examines the modeling framework regarding appropriateness, usability and applicability to various other environments and aspects.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Forschungsfragen	2
1.3	Vorgehen	3
2	Grundlagen und Ausgangssituation	5
2.1	Intelligente Verkehrssysteme	5
2.1.1	Hintergrund	5
2.1.2	Definition und Einordnung	7
2.1.3	Beispiele für Intelligente Verkehrssysteme im Autobahnverkehr	7
2.1.4	Regel- und Rahmenwerke	8
2.1.5	Kooperative Systeme: Vehicle-to-X-Kommunikation	8
2.1.6	Automatisiertes und Autonomes Fahren	10
2.1.7	Verkehrsbeeinflussende Merkmale von Verkehrssystemen	10
2.2	Modelle	12
2.2.1	Modellbegriff	12
2.2.2	Modellskalen	12
2.2.3	Modellbildungsprozess	13
2.2.4	Modellvalidierung	14
2.2.5	Quantifizierung der Komplexität analytischer Modelle	14
2.3	Sensitivitätsanalysen	15
2.3.1	Lokale Sensitivitätsanalysen	16
2.3.2	Globale Sensitivitätsanalysen	16
2.3.3	Screeningverfahren	17
2.3.4	Vorgehen bei Sensitivitätsanalysen	17
2.3.5	Sensitivitätsanalysen im Verkehrswesen	18
2.3.6	Statistiksprache R	19
2.4	Modellierung des Verkehrsablaufs	19
2.4.1	Makroskopische Verkehrsflussmodelle	20
2.4.2	Mikroskopische Verkehrsflussmodelle	22
2.4.3	Weitere Modellierungsskalen in der Verkehrstechnik	26
2.5	Verkehrssimulation	27
2.5.1	Bestehende mikroskopische Simulationswerkzeuge	27
2.5.2	Verkehrssimulation Intelligenter Verkehrssysteme	28
2.5.3	Modellierung von V2X-basierter Nachrichtenübertragung	28

2.6	Analyse von Wirkungen Intelligenter Verkehrssysteme auf den Verkehr.....	30
2.6.1	Bestehende Ansätze zur Wirkungsermittlung im Verkehr	30
2.6.2	Erhebungsmethoden.....	31
2.6.3	Definitionen Verkehrssicherheit und Verkehrseffizienz.....	31
2.6.4	Kenngößen zur Beschreibung von Wirkungen auf den Verkehr	33
2.6.5	Zweistufiges Analysekonzept.....	34
2.6.6	Integrierter Ansatz aus dem Projekt sim^{TD}	37
2.7	Modellierung von Softwaresystemen	38
2.7.1	Modellierung in der Softwaretechnik	38
2.7.2	Ablaufmodellierung mittels Zustandsautomaten	38
2.8	Prozessmodelle im Software-Engineering	40
2.8.1	Wasserfallmodell.....	40
2.8.2	V-Modell	40
2.9	Bestehende Ansätze.....	40
2.9.1	Kopplung unterschiedlicher Modellskalen in der Verkehrstechnik.....	41
2.9.2	Simulatorkopplung zur Untersuchung von V2X-Anwendungen	42
2.9.3	Bestehende Verfahren zur Systemmodellbildung	43
2.9.4	Softwarebasierte Modellierungsframeworks in anderen Fachdisziplinen	44
3	Modellierungsrahmen zur Simulation von IVS	47
3.1	Randbedingungen und Abgrenzung	49
3.1.1	Abgrenzung von der Entwicklung realer Fahrzeugsysteme	50
3.1.2	Abgrenzung von der Modellierung des Fahr(er)verhaltens.....	50
3.1.3	Synchronisation und Skalierung	50
3.1.4	Einordnung in IVS-Rahmenarchitekturen.....	51
3.2	Simulationsframework vtSim	51
3.2.1	Motivation	52
3.2.2	Einsatzmöglichkeiten	52
3.2.3	Systemarchitektur	53
3.3	Softwareframework zur Modellierung von IVS.....	54
3.3.1	Softwarekomponenten zur Applikationsmodellierung	54
3.3.2	Applikationskonfiguration.....	64
3.3.3	Adapter für konkrete Verkehrssimulationsanwendungen	66
3.4	Kurzanleitung zur Nutzung des Softwareframeworks	67
3.5	Komponenten zur Datenanalyse und Szenarienspezifikation.....	68
3.5.1	Referenzstreckennetz	68
3.5.2	Statistikmodul	72

3.6	Modellspezifikation	77
3.6.1	Textuelle Beschreibung des Systems	77
3.6.2	Zu untersuchende Wirkungen auf den Verkehr	78
3.6.3	Funktional-technische Modellspezifikation	80
3.6.4	Nicht-funktionale Anforderungen	84
3.6.5	Zustandsmodellierung.....	88
3.6.6	Modellgenauigkeit	90
3.6.7	Festlegung des zeitlich-räumlichen Untersuchungsbereichs	91
3.7	Sensitivitätsanalysen zur Modelloptimierung	94
3.7.1	Konzept der Sensitivitätsanalysen zur IVS-Modellierung	94
3.7.2	Implementierung des Systemmodells	98
3.7.3	Durchführung der Sensitivitätsanalyse	98
3.7.4	Auswertung der Analysedaten	99
3.7.5	Reduzierung der Modellkomplexität.....	100
3.7.6	Optimierung der Parameterkonfiguration hinsichtlich der System- wirkungen auf den Verkehr.....	100
3.7.7	Modellvalidierung.....	101
4	Referenzstudie zum Modellierungsrahmen.....	105
4.1	Referenzapplikation.....	105
4.2	Modellspezifikation für das Referenzsystem	106
4.2.1	Textuelle Beschreibung der Funktionalität	107
4.2.2	Technische Architektur des Referenzsystems	108
4.2.3	Erwartete Wirkungen auf den Gesamtverkehr	110
4.2.4	Zustandsmodellierung des Referenzsystems	112
4.2.5	Eingangsgrößen.....	115
4.2.6	Ausgangsparameter des Systems	117
4.2.7	Regelstrategie	118
4.3	Nicht-funktionale Anforderungen	119
4.3.1	Anforderungen an Laufzeit und Speicherbedarf.....	120
4.3.2	Anforderungen an die Genauigkeit.....	120
4.4	Sensitivitätsanalysen zur Modelloptimierung des Referenzsystems.....	121
4.4.1	Verwendetes Streckennetz.....	121
4.4.2	Konfiguration der Szenarien	122
4.4.3	Simulationsdauer	122
4.4.4	Parameter der Simulationsausführung.....	122
4.4.5	Ermittlung der benötigten Anzahl an Simulationsläufen	124

4.4.6	Aufgezeichnete Daten	124
4.4.7	Verwendete statistische Tests	125
4.5	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse	125
4.5.1	Validierung mittels Korrelationsanalyse unabhängiger und abhängiger Variablen.....	125
4.5.2	Reduzierung der Modellkomplexität mittels Sensitivitätsmaße	127
4.5.3	Funktionsoptimierung mittels Sensitivitätsmaße	128
4.5.4	Einfluss von Umgebungsvariablen auf die Systemmodellwirkung	134
4.5.5	Analyse der Verkehrswirkungen mittels makroskopischer Kenngrößenanalyse	135
5	Bewertung	139
5.1	Zweckmäßigkeit und Vollständigkeit	139
5.2	Erreichbare Modellkomplexität und Effizienz	139
5.2.1	Strukturelle Komplexität	139
5.2.2	Laufzeiteffizienz und Speicherbedarf.....	140
5.3	Übertragbarkeit	141
5.3.1	Übertragbarkeit auf weitere Anwendungen im Autobahnverkehr	141
5.3.2	Übertragbarkeit auf städtische Umgebungen	142
5.3.3	Nutzung unterschiedlicher Simulationswerkzeuge.....	142
5.3.4	Übertragbarkeit auf andere Fachdisziplinen	143
5.4	Beantwortung der Forschungsfragen	144
6	Zusammenfassung und Ausblick	147
A	Anhang - Schnittstellenspezifikation	151
B	Anhang - Simulationskalibrierung.....	154
	Literaturverzeichnis	155
	Abkürzungsverzeichnis.....	169
	Glossar	170
	Abbildungsverzeichnis	173
	Tabellenverzeichnis	177

1 Einleitung

Die Einleitung motiviert und legt die Ziele dieser Arbeit aus, indem die zentralen Forschungsfragen formuliert werden. Zudem wird das Vorgehen geschildert und damit ein Überblick über die gesamte Arbeit gegeben.

1.1 Problemstellung

Moderne *Intelligente Verkehrssysteme* (IVS) werden entwickelt, um Streckenkapazitäten, die Verkehrssicherheit auf Verkehrswegen oder auch den Fahrkomfort einzelner Fahrer zu erhöhen. Zu den Zielen der Entwicklung und Einführung Intelligenter Verkehrssysteme gehört zudem auch die Verringerung von Beeinträchtigungen der Umwelt durch Lärm und Emissionen, die vom Straßenverkehr ausgehen. In vielen Fällen steht die Einführung derartiger Technologien vor dem Hintergrund einer übergeordneten politischen Strategie des Verkehrsmanagements. Es handelt sich bei solchen Systemen um eine Vielzahl von verschiedenen Anwendungen und Hardwareeinrichtungen, die an unterschiedlichen Stellen installiert sein können. Neben infrastrukturseitigen Komponenten wie Schilderbrücken, statischen und dynamischen Verkehrszeichen oder dynamischen Steuerungsmechanismen, wie zum Beispiel adaptiv gesteuerten Lichtsignalanlagen, können dies auch rein fahrzeugbasierte Fahrerassistenzsysteme sein, die eine Wirkung auf den Verkehr anstreben. Eine Übersicht hierfür findet sich u. a. in [EUROPÄISCHE KOMMISSION 2009].

Zur Analyse von Wirkungen verschiedenster Maßnahmen und technischer Systeme auf den Straßenverkehr hat sich die Verkehrssimulation als effektives und effizientes Werkzeug etabliert. In der Simulation können geeignete Software-Repräsentationen neuartiger Systeme kostengünstig und schneller als in Echtzeit auf ihre Wirkungen hin untersucht werden, bevor sie in teuren Herstellungsprozessen produziert werden und sich im schlimmsten Fall als Fehlinvestition herausstellen. Meist werden Black-Box-Komponenten, etwa mittels *Hardware-in-the-Loop*- (HiL) oder *Software-in-the-Loop*-Integration (SiL) der fahrverhaltensbeeinflussenden Komponenten für einzelne Einheiten von Fahrern und Fahrzeugen in mikroskopischen Verkehrssimulationswerkzeugen untersucht.

Bei genauer Betrachtung der tatsächlich zu untersuchenden Wirkungen kann allerdings in vielen Fällen auf eine fahrzeug- oder komponentenfeine Auflösung und eine exakte Abbildung des funktionalen Systemablaufs verzichtet werden, die etwa der Behandlung von Sondersituationen oder der nicht verkehrsrelevanten Verbesserung des Fahrkomforts dienen. Unter Umständen ist es dabei möglich, sinnvolle und durchdachte Annahmen für das aggregierte Verhalten der Anwendung im Verkehr bezogen auf eine Menge von Fahrzeugen zu treffen, die eine meso- oder gar makroskopische Betrachtung ermöglichen.

Oft ist eine Abbildung einzelner Fahrzeuge nicht einmal möglich, weil zum Beispiel die verfügbare Simulationshardware beschränkt ist oder softwareseitig nicht unbegrenzt viele Instanzen eines Regelsystems lauffähig sind. Es ist auch denkbar, dass eine Simulation keinen Mehrwert mehr liefert, wenn sie letztlich ein schlechteres Laufzeitverhalten aufweist als ein Test im Realsystem. Dieses Phänomen ist nicht auf Modelle im Verkehrsumfeld beschränkt, sondern stellt eine typische Problematik im Modellierungsprozess aller Fachdisziplinen dar (siehe hierzu z. B. [BUNGARTZ 2009]). Trotzdem kann die Simulation mit einer wesentlichen Abstraktion eines Verkehrssystems einen großen Mehrwert bringen, solange die Nachbildung die Auswirkungen auf den Verkehrsfluss oder die Verkehrssicherheit auch im komplexen simulierten Verkehr adäquat abbildet.

1.2 Forschungsfragen

Die beschriebene Sachverhalt lässt erkennen, dass die Modellbildung und die Abschätzung der notwendigen und möglichen Genauigkeit bei der Modellierung von Intelligenten Verkehrssystemen ein bedeutendes Maß an Erfahrung und Expertenwissen erfordern. Die Anbindung von Softwaresystemen scheitert zudem häufig an Inkompatibilitäten der entsprechenden Programmierschnittstellen der verwendeten Simulationswerkzeuge. Auch die hohe Systemkomplexität, die Skalierbarkeit in Bezug auf die Laufzeit von Simulationen mit mehreren tausend Fahrzeugen und die Fehleranfälligkeit bei der Synchronisierung des Systems mit der Simulation stellen schwer lösbare Herausforderungen dar.

Die zentrale Forschungsfrage, die deshalb im Rahmen der geplanten Arbeit geklärt werden soll, ist diejenige, ob das Verfahren der Modellbildung im Kontext Intelligenter Verkehrssysteme in einem systematisierten Prozess stattfinden kann. Weiterhin ist zu klären, wie ein solcher Prozess beschaffen sein muss, damit gültige und effiziente Modelle gebildet werden können, die auf eine simulationsbasierte Wirkungsanalyse im Verkehr hin optimiert sind. Der Fokus der im Rahmen der Dissertation untersuchten Systeme soll dabei auf kooperativen Verkehrssystemen liegen, die im Autobahnverkehr zum Einsatz kommen. Ein wichtiger Aspekt der Systemauslegung ist dabei auch die Berücksichtigung und Einbindung der Nachrichtenübertragung im Umfeld kooperativer Verkehrssysteme, die auf der Kommunikation zwischen Fahrzeugen und zwischen Fahrzeugen und der Verkehrsinfrastruktur basieren.

Eine weitere Frage, die geklärt werden soll, ist diejenige nach einer generischen Anbindung von Systemmodellen Intelligenter Verkehrssysteme an verschiedene Verkehrssimulationswerkzeuge und zugehörige Komponenten. Simulationsbasierte Wirkungsuntersuchungen im Verkehrswesen können generell mit unterschiedlichen Simulationsanwendungen verschiedener Anbieter durchgeführt werden. Aufgrund sehr spezifischer Programmierschnittstellen

kann eine Systemimplementierung externer Anwendungen bislang immer nur an die Schnittstellen genau einer dieser Softwarepakete angebunden werden. Im Zuge der Erstellung des Modellierungsrahmens in dieser Arbeit soll eine Möglichkeit zur generischen Anbindung an beliebige Simulationssoftwarepakete sowie an weitere relevante spezifische Komponenten evaluiert und umgesetzt werden.

Die Simulationsanalysen, für die die Systeme modelliert werden, beziehen sich auf deren Wirkungen auf den Verkehrsfluss und/oder die Verkehrssicherheit. Daher ist außerdem die Erarbeitung eines Analysekonzeptes, das mögliche Wirkungen auf den Verkehr und deren Messbarkeit identifiziert, unerlässlich. Dazu sollen gängige Methoden, Werkzeuge und Hilfsmittel recherchiert und erläutert werden.

1.3 Vorgehen

Mithilfe einer Kombination ausgewählter Methoden aus der Verkehrstechnik, dem Software-Engineering sowie der analytischen Modellbildungstheorie soll ein Modellierungsrahmen geschaffen werden, der die durch die Forschungsfragen gestellten Anforderungen erfüllt. Zunächst findet eine Abgrenzung der zu untersuchenden Systeme von weiteren Applikationen und Einrichtungen, die im Rahmen der Arbeit nicht verwendet werden, statt. Dazu werden zentrale verwendete Begriffe aus den Bereichen Modelltheorie, Statistik, Verkehrstechnik und Software-Engineering definiert. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Einordnung der betrachteten Systemmodelle in eine geeignete Kategorisierung von Modellarten.

Weiterhin findet eine Analyse der Ausgangssituation der Arbeit statt. Diese enthält gängige Verfahren für verkehrsbezogene Analysen Intelligenter Verkehrssysteme, die in den letzten Jahren durchgeführt wurden. Berücksichtigt werden dabei auch bekannte Herausforderungen, die sich bei der Abbildung der untersuchten Verkehrssysteme ergeben. Es werden zudem bestehende Ansätze zur technischen Kopplung verschiedener Simulationsmodelle beschrieben.

Der Kern der Arbeit besteht aus der Definition eines Modellierungsrahmens, der neben der Definition eines standardisierten Ablaufs bei der Modellierung auch ein technisches Softwareframework bereitstellt und innerhalb dessen eine Analysemethodik für die Modellbildung entwickelt wird.

Eine anschließende Referenzstudie soll diesen Modellierungsrahmen im Hinblick auf seine Korrektheit und Vollständigkeit bei der Nachbildung eines modernen fahrzeugbasierten Intelligenen Verkehrssystems analysieren, bevor zum Abschluss eine zusammenfassende Bewertung des Frameworks stattfindet.

Bild 1.1 illustriert den Ablauf der vorliegenden Arbeit.

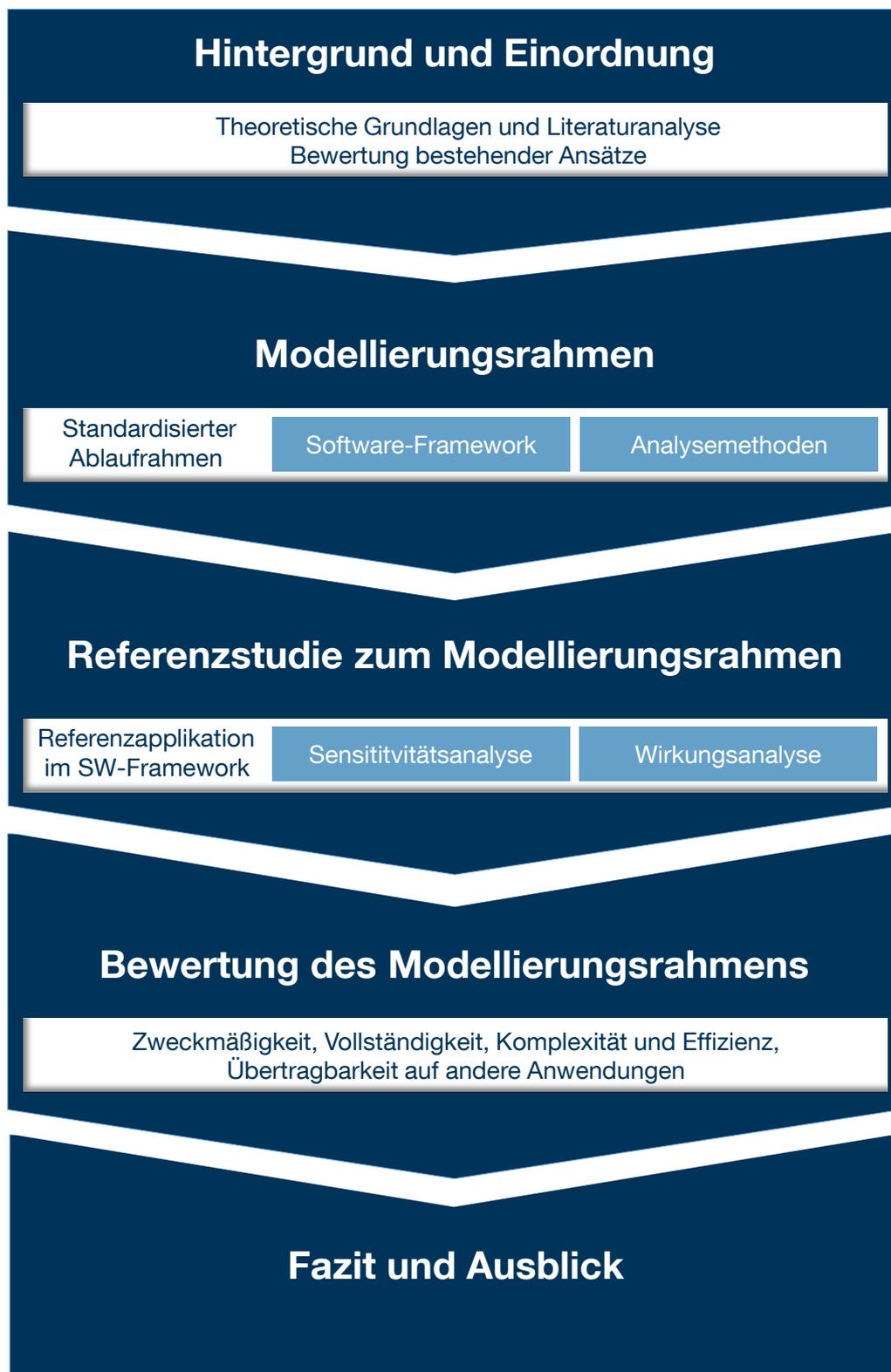


Bild 1.1 Aufbau der Arbeit

2 Grundlagen und Ausgangssituation

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über grundlegende Konzepte und Technologien, die für die Ausführungen in dieser Arbeit relevant sind. Außerdem werden ausgewählte Ansätze vorgestellt, die aufzeigen wie modellbasierte Analysen Intelligenter Verkehrssysteme nach dem Stand der Technik durchgeführt werden.

2.1 Intelligente Verkehrssysteme

Im folgenden Abschnitt wird der Begriff *Intelligente Verkehrssysteme* erklärt und Hintergründe zur Entstehung solcher Systeme beschrieben. Außerdem findet eine Einordnung in Regelwerke des Europäischen Parlaments und der Bundesregierung sowie eine Kategorisierung und Erläuterung verschiedener Systemarten statt.

2.1.1 Hintergrund

Der gesamte Fahrzeugbestand in Deutschland steigt nach Angaben des Statistischen Bundesamtes und des Kraftfahrbundesamtes weiterhin stetig an: Es gibt immer mehr Fahrzeuge pro Einwohner und pro Quadratkilometer Fläche in Deutschland [KUNERT ET AL. 2012]. In anderen europäischen Ländern ist eine vergleichbare Entwicklung festzustellen. Mit ihr geht der Bedarf an neuen Verkehrsflächen und nach effizienterer Nutzung bestehender Verkehrsinfrastruktur einher. Lange Zeit entgegnete man diesem Bedarf mit einer Erhöhung des Verkehrsangebotes, etwa dem Bau neuer Straßenabschnitte. Inzwischen ist eine Sättigung des Trends verstärkter Baumaßnahmen festzustellen. Dies hat verschiedene Ursachen:

- Durch Besiedlung und Straßenbau sind immer weniger freie Flächen verfügbar.
- Durch einen Paradigmenwechsel in der Umwelt- und Verkehrspolitik hat die Förderung des Kraftverkehrs nicht mehr die höchste Priorität. Die Berücksichtigung von Beeinträchtigungen für Menschen und Natur durch Lärm, Abgase und Landschaftsnutzung spielt eine größere Rolle.
- Es stehen in vielen Ländern weniger Finanzmittel für Investitionen in die Infrastruktur zur Verfügung.

HOLZAPFEL UND PROTZE [2013] erläutern diese Entwicklung ausführlich. Aus diesem Grund ist die Fragestellung in den Vordergrund gerückt, wie der Durchsatz bestehender Verkehrsflächen erhöht werden könnte. Gemessen wird dieser Durchsatz üblicherweise anhand der Streckenkapazität. Sie entspricht der maximalen Verkehrsstärke, die an Messquerschnitten

entlang des Streckenabschnitts erfasst wird, bevor es zum Zusammenbruch des Verkehrs und zur Staubildung kommt.

Bauliche Maßnahmen zur Kapazitätserhöhung bestehender Verkehrsinfrastruktur umfassen beispielsweise die Erweiterung von übergeordneten Straßen durch zusätzliche Fahrstreifen oder die Umgehung von Hindernissen, etwa den Austausch von Bahnübergängen durch planfreie Über- oder Unterführungen. Weiterhin spielt die Erhöhung der Verkehrssicherheit auf diesen Strecken eine wichtige Rolle. Übergeordnetes Maß ist dafür üblicherweise die Anzahl an Unfällen und Verkehrstoten, die mithilfe regulatorischer und baulicher Maßnahmen an der Straßeninfrastruktur reduziert werden soll.

Darüber hinaus existiert bereits seit den Anfangszeiten des Automobilzeitalters eine Art der Verkehrsbeeinflussung, die von tiefgreifenden baulichen Maßnahmen unabhängig ist. Schon damals wurde der Bedarf an zusätzlicher Steuerung und Sicherung des Straßenverkehrs erkannt. Die ursprüngliche und auch heute noch gängigste Form der Verkehrssteuerung erfolgt mittels statischer Verkehrszeichen zur Information und Warnung der Verkehrsteilnehmer. Weiterhin besteht eine der verbreitetsten und bekanntesten Arten der Verkehrsbeeinflussung in der Regelung von Knotenpunkten durch *Lichtsignalanlagen* (LSA), umgangssprachlich *Ampeln*. Ab den 1920er Jahren wurden in Großstädten in den USA und in Europa nach und nach immer mehr Lichtsignalanlagen aufgebaut, laut LH MÜNCHEN [2004] wurde z. B. im Jahr 1927 in München die erste Anlage installiert.

Lichtsignalanlagen können damit als erste Einrichtungen der Verkehrstechnik im Sinne mechanischer oder elektronischer Systeme der Verkehrsinfrastruktur angesehen werden. Zu derartigen Infrastruktursystemen gehören seit mehreren Jahren auch Wechselverkehrszeichen (WVZ), die auf mechanische oder elektronische Weise dynamische Informationen anzeigen können, um auf aktuelle Gegebenheiten im Verkehr (z. B. Störung, Stau, nasse Fahrbahn) reagieren und hinweisen zu können und somit ebenfalls darauf abzielen, die Verkehrssicherheit und Streckenkapazitäten zu erhöhen.

Auch für die Schaltung von Lichtsignalanlagen wurden später dynamische Verfahren entwickelt, die den Durchsatz an signalisierten Knotenpunkten in Abhängigkeit der jeweils aktuellen lokalen Verkehrssituation erhöhen sollten. Erste Anwendungen gingen Anfang der 1980er Jahre in Betrieb, wie etwa VS-PLUS von der VS AG [2004].

Mit der intelligenteren Steuerung des Verkehrs mussten auch die Verkehrszentralen an die neuen technologischen Anforderungen angepasst werden. Die POLIZEI BAYERN [2012] erwähnt, dass in München im Jahr 1967 eine der ersten Verkehrsleitzentralen eingerichtet wurde, die mithilfe eines Computers die Lichtsignalanlagen der Stadt steuern konnte. Mit dem verstärkten Einzug der Elektronik und Informationstechnologie in die Verkehrssteuerung etablierte sich der Begriff „Telematik im Verkehr“ (siehe dazu [BOLTZE ET AL. 2006]).

2.1.2 Definition und Einordnung

Durch die Weiterentwicklung der Informations- und Kommunikationstechnologien und damit auch der realisierbaren Technologien in der Verkehrsinfrastruktur und in Fahrzeugen wurden die Funktionalitäten komplexer und intelligenter. Verfahren, wie z. B. genetische Algorithmen in der von BRAUN ET AL. [2005] vorgeschlagenen Lichtsignalanlagen-Netzsteuerung oder die z. B. von WOLF ET AL. [2012] beschriebenen kooperativen Verkehrssysteme, ermöglichen schnellere und angepasste Reaktionen der Funktionen auf die Umgebung und sich ändernde Randbedingungen. Neueste Entwicklungen befassen sich zudem mit der Nutzung von Technologien der Netzwerktechnik zur Kommunikation zwischen Fahrzeugen sowie zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur um neue hochdynamische Anwendungen zur Verbesserung von Verkehrseffizienz und Verkehrssicherheit zu ermöglichen. Aus diesem Grund ist der Sprachgebrauch inzwischen von *Telematik* zu *Intelligente Verkehrssysteme (IVS)* übergegangen.

2.1.3 Beispiele für Intelligente Verkehrssysteme im Autobahnverkehr

In Tabelle 2.1 ist eine Auswahl verbreiteter Intelligenter Verkehrssysteme aufgeführt.

Bezeichnung	Beschreibung
dWiSta	Dynamischer Wegweiser mit integrierten Stauinformationen.
Verkehrslageinformation auf Basis von Floating Car Data (FCD)	Kooperative Verkehrsinformation zur Verkehrslageschätzung aus Positionsmeldungen einzelner Fahrzeuge über Mobilfunk.
Temporäre Seitenstreifenfreigabe	Freigabe des Seitenstreifens in stark belasteten Verkehrssituationen zur Kapazitätserhöhung.
Zuflussregelung	Beeinflussung der Anzahl der gleichzeitig einfahrenden Fahrzeuge an einer Schnellstraßeneinfahrt mittels Lichtsignalanlage.
<i>Adaptive Cruise Control (ACC)</i>	Fahrzeugbeeinflussende Assistenzsysteme zur Harmonisierung des Verkehrs durch automatische Abstandshaltung.
Kooperative Hinderniswarnung	Übertragung von Warn-Nachrichten per Kurstreckenfunk oder Mobilfunk von Fahrzeugen, die ein Hindernis darstellen oder erkennen an nachfolgende Fahrzeuge, die ihrem Fahrer eine entsprechende Warnung anzeigen.

Tabelle 2.1 Ausgewählte Beispiele für Intelligente Verkehrssysteme auf Autobahnen.

2.1.4 Regel- und Rahmenwerke

Mittlerweile ist die Entwicklung und Weiterentwicklung Intelligenter Verkehrssysteme weltweit zu einem hochrangigen politischen Thema geworden. Es wurde ein großes Potential derartiger Einrichtungen im Hinblick auf sichereren und effizienteren Verkehr erkannt. Aus diesem Grund wurden in Europa mehrere übergreifende Rahmen- und Leitwerke erarbeitet, die den Prozess der Entwicklung künftiger Technologien im Verkehrsumfeld führen sollen:

- Auf europäischer Ebene die „*Richtlinie 2010/40/EU zum Rahmen für die Einführung intelligenter Verkehrssysteme im Straßenverkehr und für deren Schnittstellen zu anderen Verkehrsträgern*“, die das EUROPÄISCHES PARLAMENT [2010] verabschiedete.
- Für Deutschland den *IVS Aktionsplan „Straße“*, den das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung als Rahmenplan auf Bundesebene zur Umsetzung der EU-Richtlinie aufgestellt hat [BMVBS 2012].
- Einer der wichtigsten Vorläufer des Aktionsplans ist der *Leitfaden Verkehrstelematik* von BOLTZE ET AL. [2006], dessen Inhalte zur Bewertung des Einsatzes moderner Verkehrssysteme immer noch relevant sind.

Ähnliche Regelwerke existieren u. a. auch in den USA, dort verfasst von der *Research and Innovative Technology Administration*, RITA [2011].

2.1.5 Kooperative Systeme: Vehicle-to-X-Kommunikation

Aktuelle Entwicklungen im Bereich der Verkehrstechnik beschäftigen sich mit der Konzeption und Untersuchung von kooperativen Systemen im Verkehr. Dabei werden Funktechnologien genutzt um eine Nachrichtenübertragung zwischen Fahrzeugen oder zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur zu ermöglichen. Für die beiden Aspekte werden die folgenden Begriffe verwendet:

- *Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation, Car-to-Car-Communication (C2C)* oder auch *Vehicle-to-Vehicle-Kommunikation (V2V)* und
- *Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation, Car-to-Infrastructure-Communication (C2I)* oder auch *Vehicle-to-Infrastructure-Kommunikation (V2I)*.

Auf Seiten der Infrastruktur werden zur Umsetzung von V2I spezielle Geräte am Straßenrand mit eingebauten Funkantennen installiert. Diese werden *Roadside Units (RSU)* oder auch *Roadside ITS Stations (RIS, nach der Definition von ETSI [2010])* genannt. Roadside Stations können auch in Steuergeräten von *Lichtsignalanlagen* integriert sein.

Darüber hinaus sind auch Ansätze eingeschlossen, die auf der direkten Kommunikation zwischen Fahrzeugen und anderen Einrichtungen, wie z. B. Verkehrszentralen, Diensteanbietern oder etwa mobilen Endgeräten basieren.

Der gesamte Bereich dieser Kommunikationswege wird allgemein zu den Begriffen *Fahrzeug-zu-X-Kommunikation*, *Car-to-X-Communication (C2X)* oder auch *Vehicle-to-X-Kommunikation (V2X)* zusammengefasst. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird durchgehend die Bezeichnung *V2X* verwendet. Die entstehende Netzwerkinfrastruktur wird allgemein *Vehicular Ad Hoc Network (VANET)* genannt (siehe u. a. [HARTENSTEIN UND LABERTEAUX 2010]).

Mögliche Kommunikationswege sind in Bild 2.1 grafisch dargestellt:

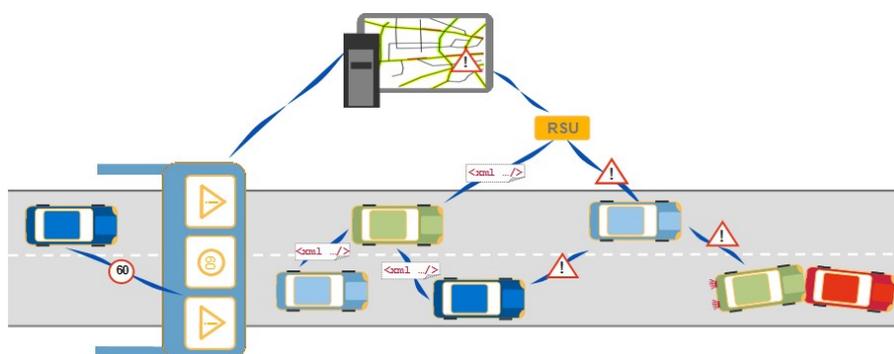


Bild 2.1 Aspekte der Kommunikation im Umfeld kooperativer Verkehrssysteme. Darstellung des Lehrstuhls für Verkehrstechnik der Technischen Universität München.

Dabei kommen zwei unterschiedliche Kommunikationstechnologien zu Einsatz:

Kurzstreckenfunk nach dem IEEE-Standard 802.11p mit spezifischen Erweiterungen wie etwa dem von der ETSI [2009] spezifizierten ITS-G5 in Europa. Speziell in den USA ist der von JIANG ET AL. [2006] erläuterte Begriff *Dedicated Short Range Communications (DSRC)* geläufig. Die entsprechende Kommunikationstechnologie wird im Konsumbereich WLAN oder, außerhalb Europas, WiFi genannt.

Mobilfunk nach den GSM-, UMTS- oder LTE-Standard, beschrieben von GLÄSER ET AL. [2008]. Für großräumige Nachrichtenverbreitung kann auf bestehende Mobilfunknetze der zweiten (GSM) dritten (UMTS) oder vierten Generation (LTE) zurückgegriffen werden.

MOUSTAFA UND ZHANG [2009] sowie HARTENSTEIN UND LABERTEAUX [2010] bieten eine Übersicht über Technologien, Standards und konzeptuelle Applikationen im Bereich der fahrzeugbasierten kooperativen Systeme. Ein aktuellerer Überblick über Applikationen, die sich in der Entwicklung befinden, findet sich in [WOLF ET AL. 2012].

Derartige Anwendungen wurden in den letzten Jahren in verschiedenen Projekten ausgiebig getestet. Beispiele für solche Forschungsprojekte sind die europäischen Aktivitäten SAFE-SPOT [2006 bis 2009], DRIVE C2X [2011 bis 2014], die französische Initiative SCORE@F [2008 bis 2010] und insbesondere in Deutschland das Feldversuchs-Projekt sim^{TD} , das in Abschnitt 2.6.6 näher erläutert ist. WEISS [2011] beschreibt den Weg von der grundlegenden Entwicklung zum Test der Anwendungen in einer realen Umgebung.

Die erwähnten Initiativen haben die Technologie soweit entwickelt und getestet, dass inzwischen erste Implementierungen auf europäischen Straßen vorbereitet werden können. Wichtigste konkrete Aktivität in Europa ist die geplante Einrichtung des *Cooperative ITS Corridor*. Dabei soll gemäß einer Erklärung von RIJKSWATERSTAAT ET AL. [2013] ab dem Jahr 2015 zunächst ein Autobahnkorridor von Rotterdam bis Wien mit straßenseitiger Infrastruktur an Baustellen ausgestattet werden. Mit der Einführung der notwendigen Fahrzeugausstattung sollen die Anwendungen *Verkehrslageerfassung* sowie *Baustellenwarnung* auf dieser Strecke in Betrieb gehen.

2.1.6 Automatisiertes und Autonomes Fahren

Derzeit finden bei vielen Automobilherstellern und verwandten Branchen intensive Forschungsarbeiten zum Thema automatisiertes und autonomes Fahren statt. Dabei geht es darum, in einem mehrstufigen Prozess Fahrzeugtechnologien und notwendige Randbedingungen zu entwickeln, die es Fahrzeugen ermöglichen, mit jeweils mehr oder weniger Unterstützung durch den Fahrer selbstständig einzelne Fahrmanöver durchzuführen oder das Führen des Fahrzeugs komplett autonom zu übernehmen. Ein aktuelles Projekt, in dem derartige Funktionalitäten und Randbedingungen untersucht werden, ist das EU-Projekt *Automated Driving Applications & Technologies for Intelligent Vehicles (AdaptIVe)*, das von ETEMAD [2014] vorgestellt wurde. Die übliche Kategorisierung der automatisierten und autonomen Fahrfunktionen gliedert sich nach dem Schema in Tabelle 2.2.

Zur Bewertung der Anwendbarkeit der in dieser Arbeit erarbeiteten Methodik wird eine Funktion als Referenz implementiert und evaluiert, die zur Klasse der hochautomatisierten Fahrfunktionen zählt. In Kapitel 4 werden in diesem Zusammenhang weitere Charakteristiken und Beispiele des automatisierten und autonomen Fahrens erläutert.

2.1.7 Verkehrsbeeinflussende Merkmale von Verkehrssystemen

Intelligente Verkehrssysteme auf Schnellstraßen können nach der Art der Beeinflussung des Gesamtverkehrs kategorisiert werden. Im Gegensatz dazu steht die hier nicht vordergründig betrachtete Beeinflussung eines einzelnen Fahrzeugs und die Wirkungen auf dieses allein.

Automatisierungsgrad	Erläuterung
Assistiertes Fahren	Der Fahrer steuert dauerhaft entweder die Längs- oder die Querführung. Die jeweils andere Fahraufgabe kann <i>bis zu einem gewissen Grad</i> durch das Assistenzsystem automatisiert werden.
Teilautomatisiertes Fahren	Das System übernimmt Längs- und Querführung. Der Fahrer muss es ständig überwachen jederzeit bereit sein, die Kontrolle zu übernehmen.
Hochautomatisiertes Fahren	Das System übernimmt Längs- und Querführung; der Fahrer muss es nicht mehr permanent überwachen. Im Falle einer Übernahmeaufforderung durch das System muss der Fahrer die Steuerung mit einem gewissen Zeitpuffer übernehmen.
Vollautomatisiertes (oder autonomes) Fahren	Das System übernimmt Längs- und Querführung vollständig und dauerhaft. Im Falle einer Übernahmeanfrage, die nicht durchgeführt wird, kehrt das System automatisch zum Zustand minimalen Risikos zurück.

Tabelle 2.2 Ebenen der Fahrzeugautomatisierung. In Anlehnung an die Definitionen der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) in [GASSER ET AL. 2012]

Tabelle 2.3 zeigt die drei wesentlichen Beeinflussungsebenen und die zugehörigen relevanten Parameter, die für eine verkehrsbeeinflussende Wirkung verantwortlich sind.

Beeinflussungsebene	Parameter	Aktiv beeinflussbar	Passiv beeinflussbar
Operativ	Längsbeschleunigung	Durch teil- oder vollautomatisiertes Fahren	ja
Strategisch	Fahrstreifenwechsel	Durch teil- oder vollautomatisiertes Fahren	ja
Taktisch	Routenänderung	Durch vollautomatisiertes Fahren	ja

Tabelle 2.3 Wirkebenen der verkehrsbeeinflussenden Parameter

Es ist anzumerken, dass sicherheitsrelevante abrupte querdynamische Fahrmanöver (*Ausweichen*) in dieser Arbeit nicht näher betrachtet werden. Fahrerassistenzsysteme, die derartige Fahrsituationen adressieren, zielen auf die individuelle Sicherheit des betroffenen Fahrers und des Fahrzeugs ab. Deren Sicherheitswirkungen auf den Gesamtverkehr sind kurzfristig und kleinräumig (beispielsweise Bremsungen nachfolgender Fahrzeuge) oder so indirekt, dass sie durch das System selbst nicht mehr vermieden werden können (z. B. Staubildung nach einem liegen gebliebenen Fahrzeug). Außerdem kommen aus Sicht der Gesamtbetrachtung des Verkehrs derartige Situationen recht selten vor. Sie wären nur für eine Einzelfahrzeugbetrachtung relevant, werden im Folgenden daher nicht berücksichtigt.

Darüber hinaus können Assistenzsysteme entsprechend [WINNER ET AL. 2012] weitere Aspekte der Fahrdynamik hinsichtlich Querschleunigung oder Traktion beeinflussen. Für diese Parameter wird angenommen, dass sie hinsichtlich der Modellierung von Verkehrswirkungen keinen direkten Effekt haben und finden daher ebenfalls im Folgenden keine Berücksichtigung.

2.2 Modelle

Dieser Abschnitt beschreibt Grundlagen der Modelltheorie, die für die späteren Ausführungen in dieser Arbeit relevant sind.

2.2.1 Modellbegriff

Ein Abbild der Realität, das in verschiedensten wissenschaftlichen Disziplinen und auch in ganz alltäglichen Situationen entworfen wird, bezeichnet man als Modell. Modelle sind das Ergebnis einer Abstraktion der Realität, d. h. man stellt wesentliche beschreibende Merkmale eines Gegenstandes, eines Vorgangs oder einer Gegebenheit in geeigneter Form dar und verzichtet dabei bewusst auf reale Elemente, die für den Zweck der Modellnutzung nicht relevant sind oder den Modellierungsaufwand im Verhältnis zum Einfluss auf das Ergebnis nicht rechtfertigen. Der Begriff *Modell* hat seinen Ursprung im Lateinischen Wort *modulus* (*Das Maß*). HARTMANN UND BAILER-JONES [2010] definieren ein Modell als „Idealisierende Nachbildung eines konkreten Objektes oder Systems. Diese Nachbildung kann material oder abstrakt theoretisch sein“.

2.2.2 Modellskalen

Modelle zeichnen sich dadurch aus, dass sie durch Komplexitätsreduktion wesentliche Merkmale von Objekten, Systemen oder Prozessen verständlich, begreifbar und prozessierbar machen. Welche diese maßgebenden Merkmale sind, hängt von der Fragestellung ab, die mit der Darstellung oder Verarbeitung des Modells beantwortet werden soll. Modellierung läuft immer auf eine Abwägung zwischen hinreichender Modellgenauigkeit im Sinne einer möglichst guten Darstellung der Realität einerseits und notwendiger Modellkomplexität andererseits hinaus. Die Qualität eines Modells besteht nicht nur in dessen struktureller Aussagekraft, sondern auch in der Anzahl und Ausprägung der Fehler, die durch eine nicht mehr überschaubare Variation einer gewissen Menge an Parametern entstehen. Die Fehlermenge in Abhängigkeit der Modellkomplexität ist in Bild 2.2 dargestellt.

Ein weiterer Aspekt ist die Nachvollziehbarkeit der Modellstruktur und damit auch der Implementierungsaufwand. Je komplexer eine Modelldarstellung wird, desto schwieriger

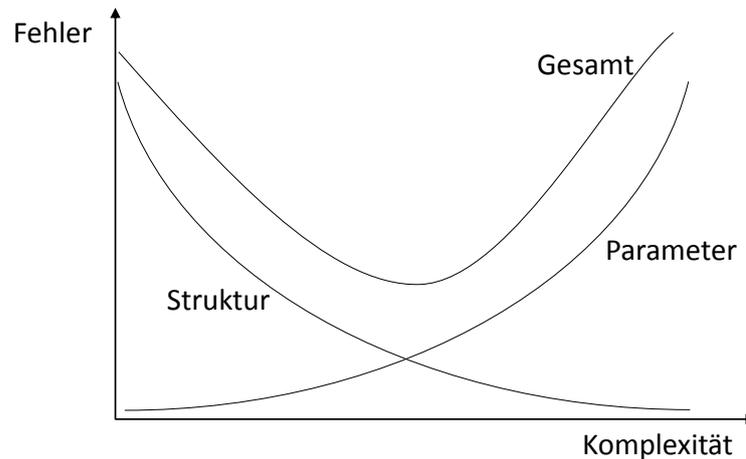


Bild 2.2 Vorhersagefehler in Modellen bei steigender Komplexität (aus PASSIOURA [1996]).

wird es, den dargestellten Sachverhalt zu verstehen und umzusetzen. In der Regel ist auch dies ein nicht-linearer Zusammenhang.

Die Maximierung der Realitätstreue bei gleichzeitiger Minimierung der Komplexität stellt damit das grundlegende Optimierungsproblem in jeder modellierenden Wissenschaft dar. Nicht immer muss dabei das analytische Optimum aus Komplexität und Nachvollziehbarkeit gefunden werden. Häufig nimmt man eine unscharfe Abbildung zugunsten einer effizienteren Verarbeitung und verständlicheren Darstellung in Kauf. Andererseits kann zur Lösung hochkomplexer Forschungsfragen mittels Hochleistungsrechnern oftmals auf eine einfach erfassbare Repräsentation verzichtet werden.

In vielen Fällen ist es möglich, gleichzeitig verschiedene Grade an Detailtiefe für eine einzige reale Gegebenheit vorzusehen. Bei den verschiedenen Stufen der Genauigkeit spricht man im Zusammenhang der Modellbildung von *Skalen*. Es können sich mehrere Modelle unterschiedlicher Komplexität ergeben, von denen sich entweder eines als das geeignetste herausstellt oder aber eine Kopplung mehrerer Modellskalen bringt die besten Ergebnisse. In der Verkehrstechnik ist traditionell die Einteilung der Betrachtung des Verkehrsablaufs in eine makroskopische und eine mikroskopische Skala geläufig. Auch dort hat sich allerdings mit der Zeit der Bedarf ergeben, die starre Trennung zwischen Makro- und Mikromodellen aufzuweichen. Die Modellskalen der Verkehrstechnik werden in Abschnitt 2.4 näher erläutert.

2.2.3 Modellbildungsprozess

Die Erstellung von Modellen in der Wissenschaft, unabhängig welcher Art, ist immer ein iterativer Prozess, der ein tiefgehendes Verständnis der modellierten Gegebenheiten erfordert. Bild 2.3 veranschaulicht einen solchen Modellbildungsprozess schematisch.

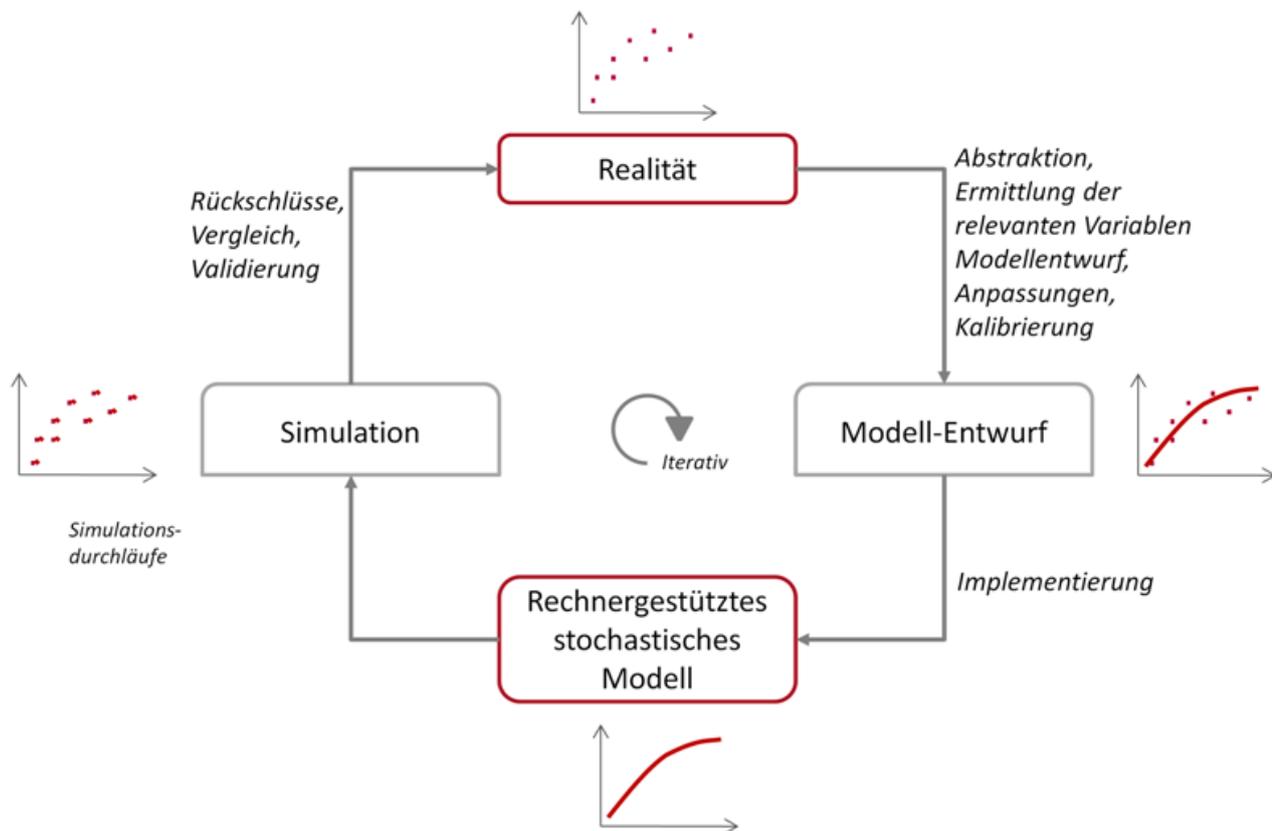


Bild 2.3 Schematische Darstellung eines typischen Modellbildungsprozesses in der Wissenschaft. Darstellung von HOFFMANN [2013].

2.2.4 Modellvalidierung

Modelle stellen immer Abstraktionen der Realität dar mit dem Ziel, diese in ihren relevanten Phänomenen so gut wie nötig und sinnvoll anzunähern. Am Ende jeder Iteration des Modellierungsprozesses ist es notwendig, eine Validierung vorzunehmen, die eine Beurteilung zulässt, wie gut die Abstraktion das reale Vorbild annähert. Eine solche Beurteilung kann auf qualitative oder quantitative Weise stattfinden. Beispiele für beide Methoden finden sich im Rahmen der Beschreibung des Modellierungsrahmens in Kapitel 3.

2.2.5 Quantifizierung der Komplexität analytischer Modelle

Um ein Modell hinsichtlich einer zu definierenden Art der Modellkomplexität optimieren zu können, müssen geeignete Maße für die Modellkomplexität gefunden werden. FLÜCKIGER UND RAUTERBERG [1995] verbinden Komplexität mit *Verständlichkeit*, *Schwierigkeit* und *Vorhersagbarkeit*. Zwischen Vorhersagbarkeit und Verständlichkeit bestehe eine Korrelation. Sie erkennen diese Eigenschaften als sehr subjektive Modelleigenschaften und erläutern verschiedene Ansätze aus der Literatur zur Objektivierung der Komplexität. Drei dieser Theorien, die im weiteren Sinn im Zusammenhang mit dieser Arbeit stehen, sind im Folgenden beschreiben:

1. **Axiomatische Berechnungskomplexität:** Die axiomatische Komplexitätstheorie stellt wichtige mathematische Komplexitätsmaße bereit. Zentrales Instrument stellt dabei die *Turingmaschine* dar. Die Turingmaschine ist nach [HOPCROFT ET AL. 2002] ein mathematisches Objekt, das algorithmische Berechenbarkeit formalisiert. Die der Komplexitätstheorie zugrundeliegenden Maße sind die Bandkomplexität (Belegung des Maschinenbandes), die Zeitkomplexität (Anzahl der benötigten Berechnungsschritte) und die Umkehrkomplexität (Anzahl der Richtungswechsel des Lese- / Schreibkopfes). Die Zeitkomplexität kann genutzt werden um die zu lösenden Probleme in Komplexitätsklassen zu zerlegen.
2. **Algorithmische Komplexität:** Auch sie stützt sich auf das Konzept der Turingmaschine. Das Maß für die algorithmische Komplexität eines Problems ist hierbei die Länge der kürzesten Turingmaschine (genauer: deren Band), die dieses Problem löst. Aus dem Satz von Rice über Unentscheidbarkeit funktionaler Aspekte von Turingmaschinen folgt allerdings, dass sich algorithmisch nicht beantworten lässt, ob eine Turingmaschine für ein Problem die kürzeste ist oder nicht [HOPCROFT ET AL. 2002].
3. **Schaltungstiefe:** Bool'sche Schaltungen können im Hinblick auf ihre Komplexität mittels der Schaltungstiefe bewertet werden (siehe z. B. [HEROLD ET AL. 2012]). Diese bemisst sich anhand der größten Distanz vom Eingangsknoten zum Ausgabeknoten der Schaltung. Dies lässt sich auch auf die in Abschnitt 2.7.2 beschriebenen Zustandsautomaten übertragen.

2.3 Sensitivitätsanalysen

Unter Sensitivitätsanalysen versteht man die Untersuchung von Einflussgrößen hinsichtlich ihrer Sensibilität in Bezug auf Änderungen von Ausgabegrößen bestimmter Systeme oder Modelle. Derartige Analysen sind verbreitet etwa in den Wirtschaftswissenschaften, wo u. a. in [FEICHTINGER UND HARTL 1986] der Begriff „Sensibilitätsanalysen“ verwendet wird, und in der Messtechnik (siehe z. B. [WIEDEMANN 1991]) sowie auch in vielen verschiedenen weiteren Disziplinen. Grundlage der Analysen bilden statistische Tests, die Veränderungen in Systemausgaben auf Signifikanz gegenüber dem Ausgangszustand bzw. zwischen verschiedenen Parametervariationen hin untersuchen. Das grundlegende Schema von Sensitivitätsanalysen ist in Bild 2.4 illustriert.

SALTELLI [2007] unterscheidet zwischen einem lokalen und einem globalen Ansatz, die beide im Folgenden erläutert werden.

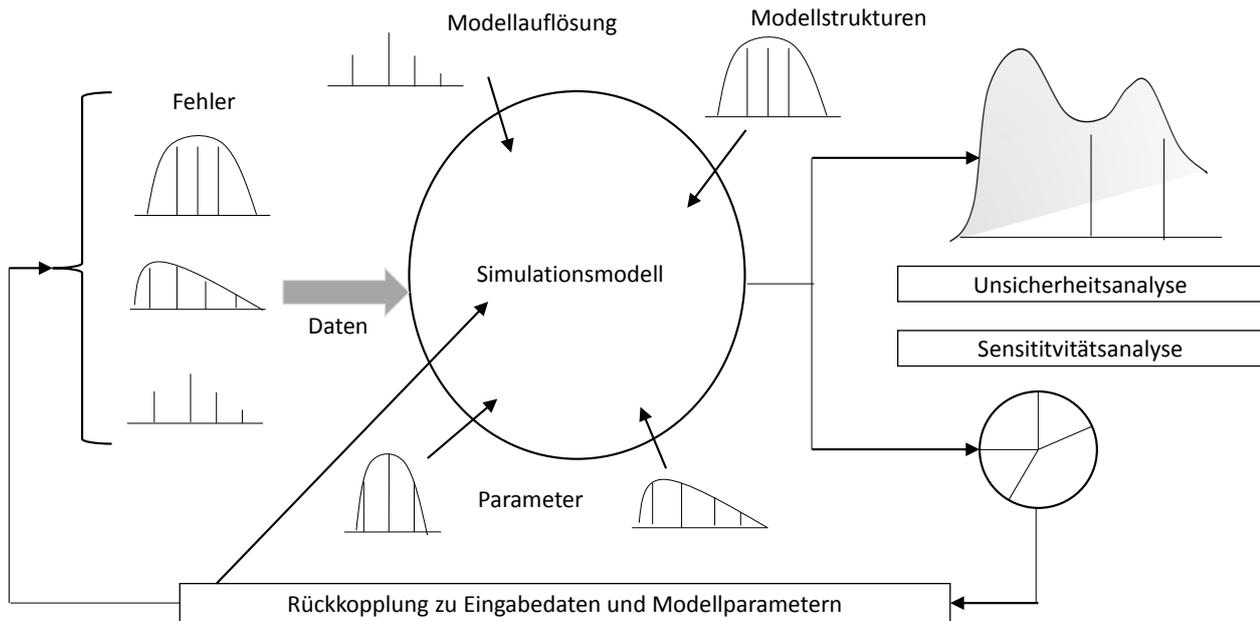


Bild 2.4 Schema einer Sensitivitätsanalyse. Darstellung in Anlehnung an SALTELLI ET AL. [2000].

2.3.1 Lokale Sensitivitätsanalysen

Lokale Sensitivitätsanalysen bestehen in der Untersuchung des Effektes eines einzelnen gegebenen Eingabeparameters X auf einen gegebenen Kennwert Y in der Systemausgabe. Der Effekt einer Parametervariation kann dabei nur dann ermittelt werden, wenn alle anderen möglichen Eingabefaktoren konstant bleiben („*ceteris paribus*“). Diese Methoden werden allgemein One-At-a-Time-Verfahren (OAT) genannt und beschränken sich auf lineare Modelle.

Die Sensitivitätsmaße basieren auf partiellen Ableitungen. Der lokale Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsparameter kann als einfache Differentialgleichung zur Beschreibung der Sensitivität S_i des Parameters X_i formuliert werden:

$$S_i = \frac{\delta Y}{\delta X_i} \quad (2.1)$$

2.3.2 Globale Sensitivitätsanalysen

Dem gegenüber untersucht eine globale Analyse zusätzlich quantitativ den Grad der „Unsicherheit“ für den Schätzwert der optimalen Ausgabe Y . Ein wichtiges Ziel ist hierbei, den Eingangsparameter X zu finden, der den größten Einfluss auf die Ausgabe Y hat. Die Bezeichnung *global* ergibt sich daraus, dass der gesamte Wertebereich für die Ein- und Ausgangsparameter X und Y betrachtet wird. Insbesondere werden Verteilungsfunktionen für die Eingangsparameter sowie die Variation mehrerer Variablen zur gleichen Zeit unterstützt.

Als gängige Methoden werden dafür Monte-Carlo-Verfahren mit verschiedenen Strategien zur Ermittlung von Zufallsstichproben genannt. Es wird damit versucht, mittels standardisierter Regressionskoeffizienten eine lineare Kombination der Eingabefaktoren zur Beschreibung eines Regressionsmodells zu finden. Vorteil dieser Methode ist entsprechend [Fox 2008] eine anschauliche Darstellungsmöglichkeiten in Scatter Plots sowie geringe Rechenzeitanforderungen für lineare Modelle. Im nicht-linearen Kontext wird dieser Ansatz nicht empfohlen, da er schnell ineffizient wird und weil bei gleichzeitiger Änderung individuelle Effekte einzelner Faktoren nicht bestimmt werden können. SCHWIEGER [2005] erwähnt, dass häufig zur Vereinfachung eine Linearisierung nicht-linearer Modelle mit Hilfe einer Taylorreihenentwicklung vorgenommen wird.

Der funktionale Zusammenhang zwischen n Eingangsgrößen $X_{1..n}$ und der Ausgangsgröße Y wird in einer Regressionsanalyse folgendermaßen formuliert:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i * X_i \quad (2.2)$$

Dabei sind b_0, b_1, \dots, b_n die zu schätzenden Regressionskoeffizienten.

2.3.3 Screeningverfahren

Screeningverfahren stellen nach MORRIS [1991] eine besondere Form globaler Sensitivitätsanalysen in Kombination mit lokalen Eigenschaften dar. Dabei werden einzelne unsensitive Parameter festgehalten, während potentiell sensitive Parameter über den gegebenen Wertebereich variabel sind. Das Screening ermöglicht es signifikante Einflüsse bestimmter Parameter zu identifizieren. Der Aufwand ist dabei wesentlich geringer als bei vollständigen globalen Sensitivitätsanalysen, die in vielen Fällen den zeitlichen Rahmen wissenschaftlicher Untersuchungen übersteigen würden. Die Anzahl der Modellausführungen ist bei den Screeningansätzen entsprechend [CAMPOLONGO ET AL. 2003] linear zur Anzahl der Modellfaktoren.

2.3.4 Vorgehen bei Sensitivitätsanalysen

Eine Sensitivitätsanalyse gliedert sich grundsätzlich in die folgenden drei Schritte:

2.3.4.1 Generierung der Stichprobe

Die Eingangsparameter, die untersucht werden sollen, unterliegen in Ihren Ausprägungen meist einer statistischen Verteilung. Im einfachsten und recht häufigen Fall ist dies eine Gleichverteilung. Es ist jedoch jede Art von statistischen Verteilungen denkbar. Wie eine solche Verteilung im konkreten Fall aussieht, lässt sich durch Experimente ermitteln oder

aus Expertenwissen ableiten. Als Grundlage für die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse ist eine solche Verteilung für jeden zu untersuchenden Eingangsparameter notwendig. Dies kann bedeuten, dass mögliche diskrete Werte aus vorangehenden Untersuchungen oder aus einem beschränkten Untersuchungsraum aufgelistet werden. Bei einem kontinuierlichen oder nicht einfach überschaubaren Parameterraum müssen jedoch Verteilungen generiert werden. Hierzu eignen sich bekannte Verfahren zur Generierung von Zufallszahlen, wie etwa die Monte-Carlo-Methode, die u. a. von HEDDERICH UND SACHS [2012] beschrieben werden.

2.3.4.2 Modellausführung

Die generierte Verteilung der Eingangsparameter kann anschließend auf das Modell angewendet werden. Dazu sind mehrfache Ausführungen des Modells notwendig. Sofern das Modell analytisch ausgeführt werden kann, ist dies mit speziellen Werkzeugen, wie etwa *SimLab* von SALTELLI [2007] einfach automatisierbar. Ist eine dynamische Simulation des Modells in einem komplexeren Kontext notwendig, muss die mehrfache Modellausführung im entsprechenden Kontext und mit dem betreffenden Simulationswerkzeug durchgeführt werden. Dies ist im hier vorliegenden Kontext der Verkehrssimulation der Fall.

2.3.4.3 Statistische Analyse

Nach der mehrfachen Ausführung des Modells mittels Simulation sind die betreffenden Resultate statistisch zu analysieren. Hierzu werden Tests, wie etwa verschiedenartige ANOVA-Verfahren, verwendet. Erläuterungen hierzu findet sich im weiteren Verlauf der Arbeit.

2.3.5 Sensitivitätsanalysen im Verkehrswesen

PUNZO UND CIUFFO [2009] untersuchten die Sensitivität von Modellparametern der mikroskopischen Verkehrssimulation AIMSUN (siehe Abschnitt 2.9.1.1) hinsichtlich ihres Einflusses auf den Verkehrsfluss. Aus den Ergebnissen folgerten sie sinnvolle Vorgehensweisen bei der Kalibrierung der zugrunde liegenden Verhaltensmodelle.

RIEMANN ET AL. [2012] beschreiben eine aktuelle Studie, die lokale Sensitivitätsanalysen für die Einflüsse spezifischer Parameter kooperativer Systeme im Verkehr enthält. Dabei werden verschiedene mögliche Einflussparameter einzeln auf ihren Einfluss auf den Verkehr hin untersucht. Es hat sich dabei gezeigt, dass verschiedene Parameter sehr unterschiedlich auf Veränderungen im Verkehrsablauf wirken. Die angestrebte V2X-Kommunikationsreichweite und in noch stärkerem Maße die Ausstattungsrate mit V2X-Fahrzeugen haben etwa für die

untersuchte Stauendewarnung einen wesentlich stärkeren Einfluss als beispielsweise die Erkennungsschwelle für Stauereignisse.

2.3.6 Statistiksprache R

Zur effizienten und einfachen Verarbeitung von Fragestellungen in der Statistik existiert eine Reihe hilfreicher Softwarewerkzeuge. Eines davon ist die Statistiksprache R, die angelehnt an die Syntax funktionaler Programmiersprachen viele Problemstellungen der Statistik mit konkreten Anfragen löst. R ist als Open Source Software unter der GNU Public License verfügbar und wurde im Jahr 1992 von IHAKE UND GENTLEMAN [1996] entwickelt. R kann auf der Kommandozeile, zusätzlich aber auch in grafischen Benutzeroberflächen, wie z. B. RGui, das mit der Windows-Version von R mitgeliefert wird, ausgeführt werden. R wird im Rahmen der in dieser Arbeit durchgeführten Sensitivitätsanalysen für alle relevanten statistischen Tests und Methoden verwendet.

2.4 Modellierung des Verkehrsablaufs

SCHNABEL UND LOHSE [2011] definieren zentrale Begriffe der Verkehrstechnik folgendermaßen:

„Unter dem Begriff des Verkehrsablaufs soll die Gesamtheit der zeitlichen und räumlichen Abwicklung der Verkehrs- und Bewegungsvorgänge auf den Straßenverkehrsflächen, wie z. B. Fahren, Beschleunigen, Bremsen, Anhalten, Warten, Kreuzen, Überholen, Einfädeln, Ausfädeln usw. verstanden werden. In Anlehnung an bestimmte physikalische Bewegungsprozesse wird die Gesamtheit der sich bewegenden Fahrzeugeinheiten oder Elemente auch als Verkehrsstrom, die Bewegung selbst als Verkehrsfluß, bezeichnet. Diese Bezeichnung verdeutlicht den dynamischen Charakter des Verkehrsablaufs.“

In Untersuchungen, die seit den 1930er Jahren durchgeführt wurden, hat sich gezeigt, dass sich der Verkehrsablauf mit den hier beschriebenen Eigenschaften in vielen Aspekten sehr gut mathematisch-analytisch beschreiben und modellieren lässt. Dabei werden Abstraktionen, formale Beschreibungen und Bezüge zu anderen Wissenschaften, deren Phänomene ähnliche Charakteristika aufweisen wie der Verkehr, hergestellt. Durch solche analytische Beschreibungen ergeben sich Modelle für den Verkehrsablauf in verschiedenen Ausprägungen. Grundsätzlich ist eine Einteilung von Modellen der Verkehrsflussdynamik in folgende Skalen und Kategorien üblich: makroskopische gegenüber mikroskopische Modelle oder auch deterministische gegenüber stochastische Modelle.

2.4.1 Makroskopische Verkehrsflussmodelle

Makroskopische Modelle beschreiben die Gesamtsicht als „Vogelperspektive“ auf den Verkehr. Aus der Bewegung einzelner Fahrzeuge kann auf die Gesamtheit aller Fahrzeuge auf einem Straßenabschnitt geschlossen werden. Hierbei gibt es wiederum Unterschiede zwischen dem Verkehrsfluss auf freier Strecke und beispielsweise an plangleichen Knotenpunkten. Der Fokus liegt hier auf Modellen des Verkehrsflusses und Verkehrsablaufes auf freier Strecke.

Mithilfe von Verkehrsmessungen an Messquerschnitten oder Luftbildbeobachtungen können lokale und momentane Messungen vorgenommen werden. Beispielhafte Fahrzeugtrajektorien mit der jeweiligen Betrachtungsebene sind in Bild 2.5 illustriert.

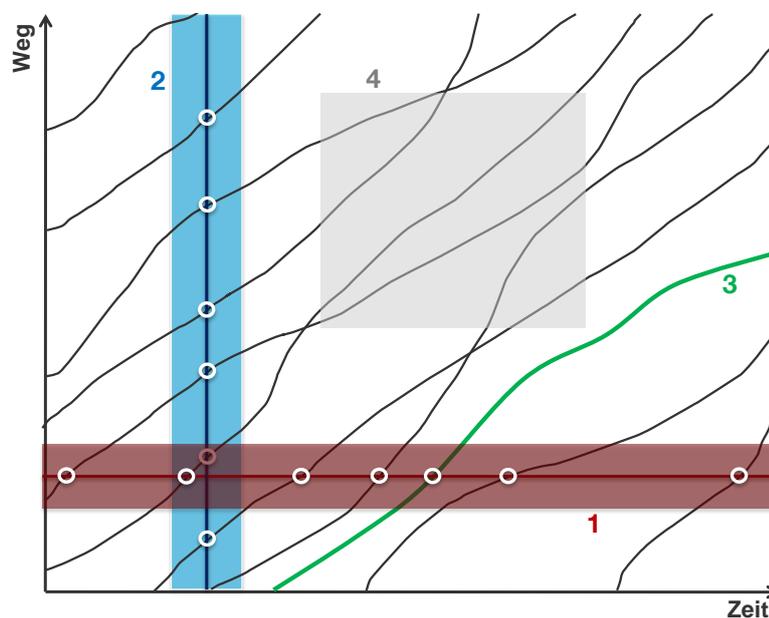


Bild 2.5 Zeit-Weg-Diagramm mit mehreren Fahrzeugtrajektorien. Eigene Darstellung in Anlehnung an [SCHNABEL UND LOHSE 2011].

Bild 2.5 zeigt die lokale Beobachtung in der horizontalen roten Markierung **(1)**. An der Position der roten Linie befindet sich ein Messquerschnitt auf der Strecke, der über die gesamte Zeit alle Fahrzeugüberquerungen erfasst. Die Überquerungen sind repräsentiert durch die Schnittpunkte der roten Linie mit den Trajektorien.

Die Anzahl der Fahrzeuge, die über einen definierten Zeitraum einen Messquerschnitt überqueren, beschreibt die Verkehrsstärke, die in der Regel genormt auf Fahrzeuge pro Stunden angegeben wird. Die Verkehrsstärke wird im Weiteren als $Q \left[\frac{Fz}{h} \right]$ angegeben.

Analog dazu ist die momentane Messung anhand der blauen vertikalen Linie dargestellt **(2)**. Die momentane Beobachtung nutzt die Betrachtung eines ganzen Streckenabschnitts, etwa durch eine Schnappschussaufnahme aus der Luft. Dabei misst man Kennwerte für Fahrzeuge, die sich zu einem festen Zeitpunkt, dem Schnittpunkt der blauen Linie mit der Zeitachse, auf diesem Streckenabschnitt befinden.

Die Anzahl der Fahrzeuge, die sich zu einem festen Zeitpunkt auf einem definierten Streckenabschnitt befinden, beschreibt die Verkehrsdichte, die in der Regel genormt auf Fahrzeuge pro Kilometer angegeben wird. Die Verkehrsdichte wird im Weiteren als K [$\frac{Fz}{km}$] angegeben.

Eine weitere wichtige Kenngröße ist in diesem Zusammenhang die mittlere momentane Geschwindigkeit \overline{V}_m [$\frac{km}{h}$], der Wert für den Durchschnitt der momentanen Geschwindigkeit aller Fahrzeuge zu diesem Zeitpunkt auf der Strecke.

Ein dritter Aspekt ist die bewegte Beobachtung, bei der ein einzelnes Fahrzeug über eine bestimmte Zeitdauer bei seiner Fahrt über den definierten Streckenabschnitt verfolgt wird und dessen Kennwerte kontinuierlich aufgezeichnet werden. Eine Fahrzeugtrajektorie ist zur Illustration grün markiert **(3)**.

Wesentliche Kenngrößen der Fahrzeugbewegung sind die Geschwindigkeit v [$\frac{km}{h}$] des Fahrzeugs sowie dessen Beschleunigung a [$\frac{m}{s^2}$].

Eine Kombination aus räumlicher und zeitlicher Betrachtung ist als graue Box im Bild dargestellt. Die räumlich-zeitliche Beobachtung erfolgt beispielsweise durch Videoaufnahmen eines Streckenabschnittes über einen längeren Zeitraum **(4)**.

2.4.1.1 Kontinuumstheorie des Verkehrs

Von zentraler Bedeutung in der Verkehrswissenschaft ist nach SCHNABEL UND LOHSE [2011] die folgende Kontinuitätsgleichung des Verkehrs, die den Zusammenhang der oben erläuterten Verkehrskenngrößen beschreibt:

$$Q = K * \overline{V}_m \quad (2.3)$$

Mit dem Zusammenhang dieser drei Kenngrößen ist das wesentliche Merkmal der Beschreibung des Verkehrsflusses definiert. Insbesondere lässt sich jeder Kennwert zur Bewertung der Verkehrsqualität und Veränderungen der Qualität, die auf gezielte Beeinflussung zurückzuführen ist, auf diesen Zusammenhang zurückführen. Diese Erkenntnis ist für die in Abschnitt 2.6 beschriebene Wirkungsermittlung verkehrsbeeinflussender Systeme von entscheidender Bedeutung.

LIGHTHILL UND WHITHAM [1955] stellten im Zuge der Untersuchung der Dichte-Fluss-Relation fest, dass die Kontinuumstheorie, mit der die Physik die Bewegung von Flüssigkeiten beschreibt, auf den Verkehrsfluss übertragbar ist. Der Zustand des Verkehrsflusses als Kontinuum wird mit der folgenden Differenzialgleichung beschrieben:

$$\frac{\delta K}{\delta t} + \frac{\delta(K * V)}{\delta x} = 0 \quad (2.4)$$

2.4.1.2 Verkehrszustände

Die Definition von Verkehrszuständen dient der qualitativen Beurteilung einer Verkehrssituation auf einem definierten Streckenabschnitt oder in einem ausgewählten Streckennetz.

Das Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ, [BAST 1999]), definiert beispielsweise vier verschiedene Verkehrszustände gemäß Tabelle 2.4. Die Einteilung dient als Grundlage für Verkehrsbeeinflussungsanlagen zur sinnvollen Steuerung des Verkehrs bei unterschiedlichen Verkehrsdichten und mittleren Fahrzeuggeschwindigkeiten.

Verkehrsstufe		1. Fahrstreifen		2. Fahrstreifen		3. Fahrstreifen		4. Fahrstreifen	
		v_{k_fz} [km/h]	k [Fz/km]	v_{k_fz} [km/h]	k [Fz/km]	v_{k_fz} [km/h]	k [Fz/km]	v_{k_fz} [km/h]	k [Fz/km]
Z1	Freier Verkehr	≥ 80	$\geq 0,$ ≤ 20	≥ 80	$\geq 0,$ ≤ 30	≥ 80	$\geq 0,$ ≤ 40	≥ 80	$\geq 0,$ ≤ 50
Z2	Dichter Verkehr	≥ 80	$\geq 20,$ ≤ 50	≥ 80	$\geq 30,$ ≤ 60	≥ 80	$\geq 40,$ ≤ 70	≥ 80	$\geq 50,$ ≤ 80
Z3	Zähfließender Verkehr	$\geq 30,$ < 80	≤ 50	$\geq 30,$ < 80	≤ 60	$\geq 30,$ < 80	≤ 70	$\geq 0,$ < 80	≤ 80
Z4	Stau	< 30	> 50	< 30	> 60	< 30	> 70	< 30	> 80

Tabelle 2.4 MARZ - Verkehrsstufen (aus [BAST 1999]).

2.4.2 Mikroskopische Verkehrsflussmodelle

Im Gegensatz zu den makroskopischen beobachteten mikroskopische Modelle die Bewegung einzelner Fahrzeuge sowie die Interaktionen der Fahrzeuge untereinander. Dabei ist grundsätzlich zwischen Modellen für die Längs- und solchen zur Nachbildung der Querdynamik zu unterscheiden. Längsdynamik bezeichnet dabei das Fahrzeugfolgeverhalten sowie die Fahrt auf freier Strecke. Die Querdynamik umfasst Strategien und die Durchführung von Fahrstreifenwechseln.

2.4.2.1 Einfache Fahrzeugfolgemodelle

Erste Untersuchungen und analytische Beschreibungen der Längsdynamik gehen zurück auf REUSCHEL [1950], der die Bewegung einzelner Fahrzeuge ausschließlich auf den geschwindigkeitsabhängigen Sicherheitsabstand zurückführt, sowie GAZIS ET AL. [1959], die zusätzlich eine Sensitivitätsbeziehung einführten.

2.4.2.2 Strategische abstands-basierte Fahrzeugfolgemodelle

Wesentliche Weiterentwicklungen der ersten abstands-basierten Folgemodelle berücksichtigen nach [TREIBER UND KESTING 2010] Fahrstrategien, die insbesondere auch das Verhalten bei freier Fahrt sowie realistische Beschleunigungswerte modellieren.

Ein bekannter Vertreter dieser Klasse ist das Modell nach GIPPS [1981]. Die Interaktion zwischen zwei Fahrzeugen unterliegt darin bestimmten Randbedingungen wie obere und untere Schranken für die gewünschte Bremsung und Beschleunigung eines Fahrers.

Ausgangspunkt ist die *sichere Geschwindigkeit* v_{safe} , die eine Reaktionszeit Δt berücksichtigt und Kollisionsfreiheit sicher stellen soll, indem der aktuelle Fahrzeugabstand s einen minimalen Sicherheitsabstand s_0 nicht unterschreiten darf. Die Beschleunigung b ist konstant. Ein weiterer Parameter ist die aktuelle Geschwindigkeit des Führungsfahrzeugs v_l . Die sichere Geschwindigkeit wird beschrieben durch:

$$v_{safe} = -b\Delta t + \sqrt{b^2\Delta t^2 + v_l^2 + 2b(s - s_0)} \quad (2.5)$$

Die Modellgleichung des Gipps-Modells ist unter Verwendung von v_{safe} folgendermaßen definiert:

$$v(t + \Delta t) = \min(v + a\Delta t, v_0, v_{safe}(s, v_l)) \quad (2.6)$$

In Abhängigkeit des Wertes für die sichere Geschwindigkeit wird damit gebremst oder beschleunigt.

Da das Gipps-Modell einerseits recht einfach umzusetzen ist, andererseits aber robuste und realistische Ergebnisse liefert, bildet es in jeweils angepasster Form die Grundlage verschiedener Simulationswerkzeuge. Die bekannteste Software, die das Gipps-Modell nutzt, ist AIMSUN, die in Abschnitt 2.9.1.1 erläutert ist.

2.4.2.3 Fahrverhaltensmodelle mit Berücksichtigung von Wahrnehmungseigenschaften

Da das Verhalten einzelner Fahrer und Fahreigenschaften der Fahrzeuge den Verkehrsablauf beeinflussen, hängen Modelle des Fahr- und Fahrerverhaltens eng mit der Modellierung des Verkehrsablaufs zusammen (siehe auch [TREIBER UND KESTING 2010]). Das Verhalten menschlicher Fahrer ist dabei beeinflusst von deren Wahrnehmungsvermögen, von dem die Erkennung von und Reaktion auf vorausfahrende Fahrzeuge abhängt. Dieser Zusammenhang wurde erstmals von TODOSIEV [1963] beschrieben. WIEDEMANN [1974] hat ein komplexeres Modell entwickelt, das die Simulation des menschlichen Fahrverhaltens im Straßenverkehr und die daraus resultierende Interaktion der Fahrzeuge ermöglicht.

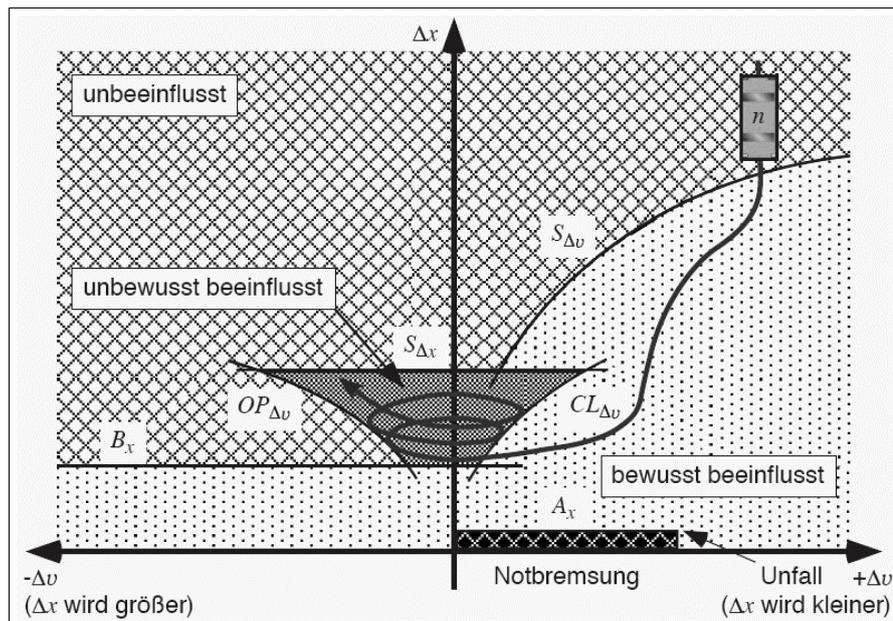


Bild 2.6 Interaktionsmodell nach Wiedemann unter Berücksichtigung von Wahrnehmungsschwellen (aus [WIEDEMANN 1974]).

Wiedemann unterscheidet dabei die folgenden drei Fahrzustände, die in Bild 2.6 grafisch dargestellt sind:

1. *Unbeeinflusstes Fahren*: Ziel des Fahrers ist es, seine Wunschgeschwindigkeit zu erreichen und beschleunigt gegebenenfalls, wenn er sie noch nicht erreicht hat.
2. *Bewusst beeinflusstes Fahren*: Sobald der Fahrer erkennt, dass ihm ein langsames Fahrzeug vorausfährt, bremst er um den gewünschten Sicherheitsabstand einhalten zu können.
3. *Unbewusst beeinflusstes Fahren*: Sobald der Fahrer den gewünschten Sicherheitsabstand zum Vorderfahrzeug erreicht hat, ist er aufgrund der Unschärfe der menschlichen Wahrnehmung und Reaktion nicht mehr in der Lage, diesen exakt einzuhalten. Er bremst und beschleunigt im Wechsel, so dass sich ein oszillierender Verlauf des Relativabstandes in diesem Zustand einstellt. Diese Oszillationen können zu Instabilitäten im Verkehrsablauf führen.

Die drei Fahrzustände sind jeweils durch *Wahrnehmungsschwellen* voneinander getrennt. Die genaue Lage dieser Schwellen in Abhängigkeit der Geschwindigkeitsdifferenz und dem Relativabstand zweier Fahrzeuge sind wesentliche Parameter des Modells, die vor dessen Nutzung in der Simulation kalibriert werden müssen. Auf den theoretischen Überlegungen zu dieser Beobachtung baute die Entwicklung des heute weltweit verbreiteten Simulationswerkzeugs VISSIM auf, das in Abschnitt 2.5.1.1 erläutert ist.

2.4.2.4 Zelluläre Automaten

Zu erwähnen sind hier außerdem die Zellulären Automaten, deren bekanntester Vertreter von NAGEL UND SCHRECKENBERG [1992] entwickelt wurde. Sie zerlegen das Straßennetz in einzelne Zellen von 7,5 m Länge. Jede dieser Zellen kann jeweils ein Fahrzeug aufnehmen. Alle Fahrzeuge in den Zellen bewegen sich entsprechend einer individuellen ganzzahligen Geschwindigkeit in diskreten Zeitschritten eine oder mehrere Zellen vorwärts. Es kommen vier Regeln zum Einsatz, die die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge in Abhängigkeit der Umgebung und unter Einbeziehung von Zufallsschwankungen regelmäßig anpassen: Beschleunigen, Bremsen, Randomisierung und Fortbewegung.

Die bisher in diesem Abschnitt genannten Modelle und ihre jeweiligen Weiterentwicklungen werden u. a. in [HELBING 1997] näher erläutert.

2.4.2.5 Fahrstreifenwechselmodelle

Zur realistischen Abbildung des Verkehrs auf mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen ist es unerlässlich, Fahrstreifenwechsellvorgänge realitätsnah abzubilden. Die detailgetreue Modellierung von Fahrtrajektorien während des Fahrstreifenwechsels ist weiterhin wichtiger Gegenstand der Fahrverhaltensforschung.

Zwei Modellansätze, die dabei in aktuellen Simulationswerkzeugen zum Einsatz kommen, werden im Folgenden beschrieben:

Sparmann: SPARMANN [1978] beschreibt auf Basis empirischer Analysen das taktische Fahrstreifenwechselverhalten von Fahrzeugen auf zweistreifigen Schnellstraßen. Er unterscheidet dabei zwischen zwei Verhaltensweisen, die er als unterschiedlich erachtet:

1. Wechsel vom rechten („Fahrspur“) auf den linken Fahrstreifen („Überholspur“): Um seine Wunschgeschwindigkeit realisieren zu können, muss ein Fahrzeug gegebenenfalls langsamere vorausfahrende Fahrzeuge überholen. Sparmann hat dabei beobachtet, dass häufig deutlich geringere Abstände zum Fahrzeug auf dem Zielfahrstreifen in Kauf genommen werden als dies bei freier Fahrt ohne Fahrstreifenwechsel der Fall ist.
2. Wechsel vom linken auf den rechten Fahrstreifen: Der Fahrer möchte das Rechtsfahrgebot einhalten und andere Fahrzeuge möglichst wenig behindern.

Die Überlegungen von Sparmann sind in die Entwicklung der Verkehrssimulationsumgebung VISSIM (siehe Abschnitt 2.5.1.1) eingeflossen.

Krajzewicz: Im Zuge der Entwicklung der Simulationssoftware SUMO (siehe Abschnitt 2.5.1.4) entstand das Fahrstreifenwechselmodell von KRAJZEWICZ [2009]. Es berücksichtigt die geographischen Gegebenheiten in komplexen Straßennetzen. Die Annahme besteht darin, dass Fahrer frühzeitig den Fahrstreifen antizipieren, der für die Fortsetzung der gewünschten Fahrtroute relevant ist. Zudem ist eine Vorteilsfunktion vorgesehen, die aus der Differenz der Wunschgeschwindigkeit und der maximal möglichen Geschwindigkeit auf dem aktuell befahrenen und den Nachbarfahrstreifen den momentan geschwindigkeitsoptimalen Fahrstreifen ermittelt.

2.4.3 Weitere Modellierungsskalen in der Verkehrstechnik

Neben der mikroskopischen und makroskopischen Modellierung haben sich weitere Betrachtungsskalen etabliert. Als wichtigste sind die *mesoskopische* und die *sub-mikroskopische* Betrachtung zu nennen:

Mesoskopische Modelle verknüpfen mikroskopische und makroskopische Elemente miteinander und stellen damit eine Zwischenebene dar. Dabei werden beispielsweise Fahrzeugpuls statt Einzelfahrzeuge betrachtet. Die genaue Auslegung der mesoskopischen Ansätze unterscheidet sich innerhalb der verschiedenen Implementierungen recht stark (siehe hierzu auch die Ausführungen in [TREIBER UND KESTING 2010]). Ein Beispiel für eine mesoskopische Simulation ist DYNEMO von WIEDEMANN UND SCHWERDTFEGER [1987]. Eine denkbare Auslegung der mesoskopischen Modelle ermöglicht die Einordnung der Simulationsanwendung MATSim in diese Klasse. MATSim wurde von der TU Berlin in Zusammenarbeit mit der ETH Zürich entwickelt und basiert auf der Annahme, dass einzelne Fahrzeuge als Agenten angesehen werden können, die sinnvolle vorgegebene Wege zu definierten Zwecken zurücklegen. Die Betrachtung der Fahrzeugbewegungen folgt jedoch makroskopischen Gesetzmäßigkeiten. Die Mischung der beiden Sichten kann als mesoskopische Charakteristik betrachtet werden. MATSim hat seine Ursprünge in den Arbeiten von RANEY ET AL. [2003].

Außerdem gibt es unterhalb der mikroskopischen Betrachtung auch eine Ebene, die *sub-mikroskopisch* oder auch *nanoskopisch* genannt wird. Dabei werden für einzelne Fahrzeuge nicht nur die Bewegungskenngrößen wie Geschwindigkeit oder Beschleunigung betrachtet und beeinflusst, sondern auch die zugrunde liegende Fahrzeugdynamik. Es wird also beispielsweise auch der Einfluss des Lenkwinkels und der Auslegung des Antriebsstrangs berücksichtigt. Dies kann zur fahrdynamischen Untersuchung neuer Fahrerassistenzsysteme relevant sein, wenn nicht nur übergeordnete Effekte im Gesamtverkehr, sondern die Straßenlage und der Fahrkomfort einzelner Fahrzeuge beurteilt werden soll. Ein bekannter

Vertreter der sub-mikroskopischen Simulationsmodelle ist PELOPS, das in Abschnitt 2.5.1.3 beschrieben ist.

2.5 Verkehrssimulation

Die Umsetzung der genannten Modelle erfolgt bereits seit mehreren Jahrzehnten in unterschiedlichen Software-Werkzeugen zur Simulation des Verkehrsflusses und -ablaufs. Eine umfassende allgemeine Einführung in Grundlagen zur Verkehrssimulation sowie ein Verzeichnis verschiedener mikroskopischer und außerdem etablierter makroskopischer Simulationswerkzeuge findet sich u. a. in [BARCELO 2010].

2.5.1 Bestehende mikroskopische Simulationswerkzeuge

Die nachfolgenden Abschnitte enthalten eine unvollständige Auswahl von häufig eingesetzten mikroskopischen Simulationsanwendungen:

2.5.1.1 VISSIM

Verkehr In Städten SIMulation (VISSIM) ist eine der Softwaresimulationen im Verkehr, die weltweit am weitesten verbreitet sind. Sie stammt von der Firma PTV in Karlsruhe.

VISSIM entstand aus einer Implementierung des Fahrverhaltensmodells von Wiedemann (siehe Abschnitt 2.4.2.3), das in erweiterter Form auch heute noch die Grundlage für die Abbildung des Fahrverhaltens bildet. Der Ausgangspunkt für die Entwicklung von VISSIM war der Bedarf einer Simulationsumgebung zur Evaluierung verschiedener Steuerungsverfahren. FELLENDORF UND VORTISCH [2001] führen die historische Einordnung und grundlegende Konzepte von VISSIM aus. Eine Stärke von VISSIM ist die Möglichkeit, auch komplexe Netzgeometrien und Verkehrsnachfrageszenarien detailliert abzubilden.

2.5.1.2 AIMSUN

Ein weit verbreitetes Softwarepaket, das zur mikroskopischen Simulation des Verkehrs eingesetzt wird, ist AIMSUN von der Firma TSS. Da es jedoch über die reine mikroskopische Simulation auch die mehrskalige Simulation verschiedener Verkehrsräume beherrscht, ist es in Abschnitt 2.9.1.1 zur Kopplung verschiedener Modellskalen näher erläutert.

2.5.1.3 PELOPS

PELOPS (**P**rogramm zur **E**ntwicklung **L**ängsdynamischer, **mikrO**skopischer Verkehrs**P**rozesse in **S**ystemrelevanter Umgebung) gehört zur Klasse der sub-mikroskopischen Verkehrssimulationen. Es wird von der Forschungsgesellschaft für Kraftfahrwesen Aachen (fka) in

Zusammenarbeit mit der BMW AG entwickelt. Grundlegendes Fahrzeugfolgmodell ist, wie bei VISSIM, das Modell von Wiedemann. PELOPS ist darüber hinaus in der Lage, die Fahrdynamik einzelner Fahrzeuge detailliert abzubilden. Die Berechnung von Fahrparametern wie der Fahrzeugbeschleunigung basiert beispielsweise, anders als in der abstrakteren Betrachtung in VISSIM oder AIMSUN, auf Wirkungen von Aktoren wie des Antriebsstrangs oder des Lenkradwinkels. Dagegen sind die Möglichkeiten begrenzt, bei der Simulation mit PELOPS größere Streckennetze oder komplexe Straßengeometrien abzubilden. Auch die Anzahl der Fahrzeuge in der Simulation ist aufgrund der komplexen Berechnung der Fahrdynamik eingeschränkt. LUDMANN ET AL. [1992] beschreiben die Grundlagen und Modelle, die in PELOPS umgesetzt wurden.

2.5.1.4 SUMO

Simulation of Urban MObility (SUMO) ist eine quelloffene mikroskopische Simulationssoftware. Es nutzt in der Standardausführung das Fahrverhaltensmodell von KRAUSS [1998]. Es bietet aber die Möglichkeit, es auszutauschen gegen andere Modelle. So ist beispielsweise bereits eine prototypische Anbindung des Wiedemann-Modells erfolgt. Grundsätzlich wird SUMO mithilfe von Konfigurationsdateien parametrisiert. Es existiert jedoch auch eine grafische Benutzeroberfläche zur Konfiguration und Simulation (*sumo-gui*).

Details zu SUMO finden sich bei [KRAJZEWICZ ET AL. 2002].

2.5.2 Verkehrssimulation Intelligenter Verkehrssysteme

Seit einigen Jahren dienen Simulationswerkzeuge immer mehr der Analyse von Wirkungen moderner verkehrsbeeinflussender Systeme auf den Verkehr. Hierbei stehen mikroskopische Simulationen besonders im Fokus. Das übliche Vorgehen besteht darin, bestehende Simulationswerkzeuge zu nutzen und externe Systeme, wie die in Abschnitt 2.1 beschriebenen, daran anzubinden. Ziel der Untersuchungen im simulierten Verkehrsumfeld ist es, herauszufinden, ob und in welchem Ausmaß derartige Mechanismen Einfluss auf die in Abschnitt 2.6.3 erläuterten Kennwerte haben.

2.5.3 Modellierung von V2X-basierter Nachrichtenübertragung

Im Umfeld der Wirkungsermittlung moderner Anwendungen der V2X-Technologie (siehe Abschnitt 2.1.5) ist die Verkehrssimulation mittlerweile als weitverbreitetes Analysewerkzeug etabliert. In diesem Zusammenhang ist es unumgänglich, dass die Übertragung der Nachrichtenpakete, die zwischen den Fahrzeugen oder zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur ausgesendet werden, eine realitätsgetreue Entsprechung in der Simulation finden. Phänomene wie Paketkollisionen, Paketverluste oder Übertragungslatenzen haben

entscheidenden Einfluss auf die Generierung von Fahrerinformationen beziehungsweise -warnungen oder aktive Fahrzeugeingriffe, die auf diesen Nachrichten basieren. Eine vor allem im Bereich der Entwicklung von Kommunikationstechnologie verbreitete Methode ist die Kopplung von Verkehrssimulationsanwendungen mit Kommunikationssimulatoren (siehe dazu auch Abschnitt 2.9.2). Dabei wird in jedem Zeitschritt der Verkehrssimulation für alle Fahrzeuge, die virtuelle Nachrichten aussenden, ein Aufruf des angebundenen Kommunikationssimulators angestoßen, der dann eine Verbreitung der Nachrichten über das Simulationsnetz nachbildet. Dieser Ansatz erlaubt eine sehr genaue Verfolgung der einzelnen ausgesendeten Nachrichtenpakete. Jedoch ist der benötigte Rechenaufwand hinsichtlich Laufzeit und Speicherbedarf sowie die technische Komplexität der Schnittstellenanbindung äußerst hoch. Aus diesem Grund ist dieses Vorgehen bislang auf kleinräumige Verkehrsszenarien beschränkt. Eine große Anzahl von Fahrzeugen (bis zu mehreren Tausend in geläufigen Verkehrssimulationsstudien) kann auf diese Weise nicht behandelt werden. KILLAT [2009] und PROTZMANN ET AL. [2010] haben festgestellt, dass zur Analyse von Wirkungen auf den Straßenverkehr eine solch detaillierte Simulation der Nachrichtenübertragung nicht notwendig ist. Aus diesem Grund entwickelten KILLAT ET AL. [2007] das Modell *Vehicluar COMmunications (VCOM)*, das eine aggregierte Betrachtung einer größeren Menge übertragener Pakete vornimmt.

Es stellt auf Grundlage von validierten Untersuchungen in geeigneten Kommunikationssimulatoren Wahrscheinlichkeitsfunktionen für den Empfang von Nachrichtenpaketen zur Verfügung. Mithilfe von Zufallswerten kann eine solche Wahrscheinlichkeitsfunktion für ein Fahrzeug abschätzen, ob es zuvor ausgesandte Pakete empfängt oder nicht. Es wird zunächst die Verwendung des Kommunikationsstandards IEEE 802.11p für Kurzstreckenfunk angenommen. Parameter sind im ursprünglichen Modell (bezeichnet als VCOM07) die Entfernung zwischen Sender und Empfänger sowie die aktuell vorherrschende Verkehrsdichte im für die Kommunikation relevanten Bereich. Dabei wird von bestimmten Randbedingungen und Voraussetzungen ausgegangen, die in [KILLAT ET AL. 2007] beschrieben sind. Bild 2.7 zeigt die Wahrscheinlichkeitsfunktionen, die dem Modell VCOM zugrunde liegen.

Im Rahmen des Projektes sim^{TD} fand eine Erweiterung dieses Modells durch das Institut für Telematik des Karlsruher Instituts für Technologie statt, die u. a. die Berücksichtigung innerstädtischer Szenarien und die Nutzung von Annahmen zur Mobilfunkkommunikation umfasst. Das erweiterte VCOM-Modul ist im entsprechenden Bericht [GAUGEL ET AL. 2011] dokumentiert.

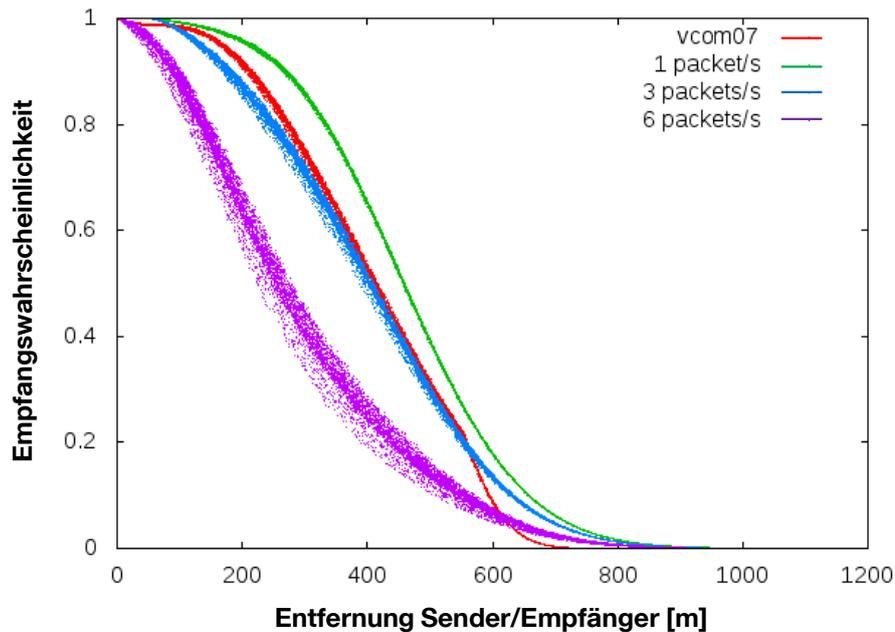


Bild 2.7 VCOM-Modell zur Ermittlung von Wahrscheinlichkeiten für den V2X-Nachrichtenempfang in Verkehrssimulationen (aus GAUGEL ET AL. [2011]).

2.6 Analyse von Wirkungen Intelligenter Verkehrssysteme auf den Verkehr

Zur Bewertung des Nutzens von Verkehrssystemen sind Wirkungsanalysen unerlässlich. Ein positiver Einfluss auf den Verkehrsfluss und/oder die Verkehrssicherheit kann aus volkswirtschaftlicher Sicht enorme Einsparungen bewirken. Andererseits kann eine ungewollte Beeinträchtigung des Verkehrs ebenso viele Kosten verursachen. Dies betrifft zum einen Systeme und Verfahren, die sich in der Entwicklung befinden und für die eine ex-ante-Abschätzung hinsichtlich ihrer volkswirtschaftlichen Wirkungen in der Zukunft, z. B. mittels Simulationen, benötigt wird. Zum anderen können bestehende Ansätze nachträglich (ex post) auf ihre tatsächlichen Wirkungen hin untersucht werden.

WIECHMANN UND BEIER [2005] beschreiben derartige Evaluierungsverfahren für die Regionalentwicklung in Deutschland allgemein. Eine Analyse Intelligenter und automatisierter Verkehrssysteme aus soziologischer Sicht wurde beispielsweise von LORENZ [2008] durchgeführt.

2.6.1 Bestehende Ansätze zur Wirkungsermittlung im Verkehr

BOLTZE ET AL. [2006] betonen die Wichtigkeit der Wirkungsermittlung für Leitsysteme im Verkehr, die eine Teilmenge der Intelligenten Verkehrssysteme darstellen. Sie empfehlen neben der Nutzung der Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Straßen [FGSV 1997] auch weiter gehende Untersuchungen. Dabei ist das Hinweispapier [FGSV 2007] zu berücksichtigen, das inzwischen von BUSCH [2009] ergänzt wurde.

Beispiele für Projekte und Studien, in denen derartige Wirksamkeitsuntersuchungen beschrieben werden, sind, unter vielen anderen, folgende:

- SCHICK [2003] untersucht die Wirksamkeit von Streckenbeeinflussungsanlagen.
- GLASER ET AL. [2005] schlagen ein Bewertungsverfahren für Wirkungen von Fahrerassistenzsystemen auf den Verkehr vor.
- Im Projekt sim^{TD} wurden die Wirkungen verschiedener kooperativer Systeme auf Verkehrseffizienz und -sicherheit untersucht. Siehe dazu auch Abschnitt 2.6.6.

2.6.2 Erhebungsmethoden

In Bezug auf Verkehrsfluss und -sicherheitsanalyse existieren verschiedene Möglichkeiten Daten zu erheben, die mittels Aufbereitung zu Indikatoren als Untersuchungsgrundlage genutzt werden können. Die gängigsten sind hier aufgelistet:

- Verkehrszählungen durch Detektoren (z. B. Induktivschleifen) im laufenden Betrieb.
- Aufzeichnung von Daten ungesteuerter Fahrzeuge mittels Fahrzeugbusanalyse.
- Feldversuch mit gezielter Steuerung von Fahrzeugen und Aufzeichnung von Fahrzeugbusdaten.
- Verkehrssimulationen.

BAUR ET AL. [2012] erläutern einen Ansatz, der verschiedene Untersuchungsumgebungen kombiniert, um die jeweiligen Vorteile optimal auszunutzen.

2.6.3 Definitionen Verkehrssicherheit und Verkehrseffizienz

Im Hinblick auf die Analyse von Wirkungen auf den Verkehr sind die beiden übergeordneten Wirkdimensionen *Verkehrssicherheit* und *Verkehrseffizienz* von zentraler Bedeutung. Nachfolgend werden diese beiden Begriffe ausgehend von relevanten Forschungsarbeiten definiert und zudem erläutert, wie diese Wirkdimensionen jeweils quantifiziert werden können.

2.6.3.1 Verkehrssicherheit

WILTSCHKO [2004] und HOFFMANN [2013] messen Verkehrssicherheit an der Eintrittswahrscheinlichkeit für Konfliktsituationen im Straßenverkehr. Aus diesem Grund sehen sie die Verkehrskonflikttechnik, die u. a. von ZIMOLONG [1982] und ERKE UND GSTALTER [1985] vertreten wird, als zentrales Element der Verkehrssicherheitsforschung. Annahme dabei ist, dass die Wahrscheinlichkeit von Unfällen im Straßenverkehr durch *Ersatzkenngrößen*

abgeschätzt werden kann. Derartige Ersatzkenngrößen sind u. a. die *Nettozeitlücke* und die *Zeit bis zur Kollision*.

Von Bedeutung ist zudem die Abgrenzung zur *Fahrsicherheit*, bei der die objektive und subjektive Sicherheit einzelner Fahrer während der Fahrt betrachtet wird, während zur Verkehrssicherheit alle Kenngrößen über alle Fahrzeuge innerhalb eines definierten räumlich-zeitlichen Bereich aggregiert werden. Die Aggregationsprozedur ist in Abschnitt 2.6.5 erläutert.

2.6.3.2 Verkehrseffizienz

Verkehrseffizienz wurde im Projekt sim^{TD} definiert als angestrebte Wirkung hinsichtlich der Qualität des Verkehrsflusses (siehe z. B. [BRAUN ET AL. 2011]). Zentrale Maße für Verkehrseffizienz sind Verkehrsstärken und Durchschnittsgeschwindigkeiten auf Streckenabschnitten oder in Straßennetzen. In direkter Verbindung zu den Durchschnittsgeschwindigkeiten stehen die mittleren *Reise-, Fahrt- oder Verlustzeiten*. Diese bezeichnen die Mittelwerte der Fahrdauer aller Fahrzeuge, die diese benötigen, um von einem definierten Startpunkt zu einem definierten Endpunkt der Reisezeitmessung zu gelangen. Im realen Verkehr werden solche Messungen mithilfe von Kennzeichenwiedererkennung durch zwei Kameras, jeweils eine am Start- und Endpunkt, durchgeführt. In der Verkehrssimulation können die relevanten Mittelwerte direkt aus den Aufzeichnungen der Fahrzeugtrajektorien berechnet werden. Zur Ermittlung von *Verlustzeiten* wird eine vorgegebene ideale Reisezeit von der tatsächlich gemessenen Reisezeit abgezogen.

2.6.3.3 Gegenläufigkeit der Wirkdimensionen

Eine bedeutende Grundannahme jeder Analyse von Verkehrswirkungen ist die Gegenläufigkeit der Wirkdimensionen Verkehrssicherheit und Verkehrseffizienz. Vereinfacht dargestellt stellt etwa TEICHGRÄBER [1983] fest, dass die Verkehrssicherheit grundsätzlich durch eine Verringerung der mittleren Geschwindigkeiten der Fahrzeuge erhöht wird. Gleichzeitig erhöht eine niedrigere Durchschnittsgeschwindigkeit jedoch die Reisezeiten. Die Verbesserung der Verkehrssicherheit geht damit auf Kosten der Verkehrseffizienz. Aus diesem Grund ist eine wichtige Voraussetzung für die Spezifikation verkehrsbeeinflussender technischer Systeme, die in dieser Arbeit behandelt werden, dass die angestrebte Wirkdimension eindeutig definiert ist.

Ein zentrales Paradigma in der Verkehrstechnik, das versucht, diese Gegenläufigkeit aufzulösen, ist die Beeinflussung durch *Harmonisierung*. Dabei sollen durch Vereinheitlichung von Geschwindigkeiten und Fahrzeugabständen Inhomogenitäten im Verkehr minimiert und damit gleichzeitig Verkehrssicherheit und Verkehrseffizienz adressiert werden. Wichtige

Ansätze stellen Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA, siehe z. B. [BOLTZE ET AL. 2006]) oder automatisierte Abstandshaltesysteme wie das in der Referenzstudie in Abschnitt 4 vorgestellte CACC-System dar.

2.6.4 Kenngrößen zur Beschreibung von Wirkungen auf den Verkehr

In Abschnitt 2.1.7 wurden Faktoren von Verkehrssystemen genannt, die den Verkehrsfluss beeinflussen können. Im Folgenden wird näher erläutert, wie dieser Einfluss in Form von Wirkungen auf Verkehrssicherheit und Verkehrseffizienz quantifiziert werden kann. Diese Quantifizierung ist die Grundlage einer volkswirtschaftlichen Beurteilung der untersuchten Funktionalität. Zur grundlegenden Analyse im Rahmen dieser Arbeit werden u. a. die nachfolgend erläuterten Kenngrößen verwendet:

2.6.4.1 Nettoabstand

Der *Nettoabstand* dn (auch *Nettoweglücke*, engl. *net distance*) ist der räumliche Abstand der Vorderkante eines Fahrzeugs zur Hinterkante des direkt vorausfahrenden Fahrzeugs. Bild 2.8 zeigt diesen Sachverhalt schematisch.



Bild 2.8 Nettoabstand zwischen zwei Folgefahrzeugen. Eigene Darstellung.

2.6.4.2 Nettozeitlücke

Die *Nettozeitlücke* thn [s] (engl. *time headway*) ist die Zeit, die ein Fahrzeug bei aktueller gefahrener Geschwindigkeit v benötigen würde, um den aktuellen Nettoabstand dn zum vorausfahrenden Fahrzeug zurückzulegen. Nach dieser Zeit käme es also zu einer Kollision, wenn das vorausfahrende Fahrzeug die Geschwindigkeit 0 hätte.

Die Nettozeitlücke ist somit folgendermaßen definiert:

$$thn = \frac{dn}{v} \quad (2.7)$$

2.6.4.3 Zeit bis zur Kollision

Die Kenngröße *Zeit bis zur Kollision* t_{tc} [s] (engl. *time to collision*) beschreibt die Zeit, die es bis zu einer Kollision zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen dauern würde, wenn beide über diesen Zeitraum ihre Geschwindigkeit nicht ändern, also die Differenzgeschwindigkeit zwischen beiden Fahrzeugen δv konstant bleibt. Dies ist nur relevant, wenn das nachfolgende Fahrzeug schneller fährt als das vorausfahrende.

Die Zeit bis zur Kollision ist somit folgendermaßen definiert:

$$t_{tc} = \begin{cases} \frac{dn}{\delta v}, & \text{wenn } \delta v > 0, \\ \text{unendlich}, & \text{wenn } \delta v \leq 0. \end{cases} \quad (2.8)$$

mit $\delta v = v_1 - v_2$ (Fahrzeug 1 folgt Fahrzeug 2)

2.6.5 Zweistufiges Analysekonzept

Die Berechnung von Kenngrößen im Verkehr erfolgt, wie etwa im Projekt sim^{TD} (siehe Abschnitt 2.6.6) aufgezeigt, in zwei Stufen. Dieses zweistufige Analysekonzept begründet sich in der Absicht einer aggregierten Betrachtung des Gesamtverkehrs. Diese Aggregation erfolgt zum einen auf der Ebene eines einzelnen Fahrzeugs, zum anderen in der Zusammenfassung dieser aggregierten Werte aller Fahrzeuge in einem betrachteten zeitlich-räumlichen Bereich, der vor der Auswertung sinnvoll zu bestimmen ist. Die Auswahl dieses Bereichs orientiert sich in der Regel an der Position und Zeit eines untersuchungsrelevanten Ereignisses (z. B. Baustelle oder Stau) oder an einem für die Auswertung repräsentativen Streckenabschnitt zu einer gewählten Zeit. Das Konzept ist sowohl in einer Messung auf realen Straßen als auch zur Analyse von Verkehrssimulationen anwendbar.

2.6.5.1 Erste Stufe: Aggregation Einzelfahrzeug

Bild 2.9 zeigt ein Zeit-Weg-Diagramm, wie es in Abschnitt 2.4.1 beschrieben wurde. Zur Erläuterung der ersten Aggregationsstufe wird eine Beispieltrajektorie ausgewählt. Diese ist im Diagramm grün markiert. Der graue rechteckige Bereich markiert den für die Auswertung relevanten räumlich-zeitlichen Ausschnitt auf einer Strecke vom Ort d_1 bis zum Ort d_2 und im Zeitraum zwischen den Zeitpunkten t_1 und t_2 .

Für das anhand dieser Trajektorie beobachtete Fahrzeug ist in Bild 2.10 der Verlauf der momentanen Fahrzeuggeschwindigkeit v anhand der schwarzen Kurve innerhalb des Auswertungsbereiches aufgetragen. Üblicherweise erfolgt die Aufzeichnung sowohl in realen Fahrzeugen (CAN-Bus-Aufzeichnung) als auch in Verkehrssimulationen in diskreten Zeitab-

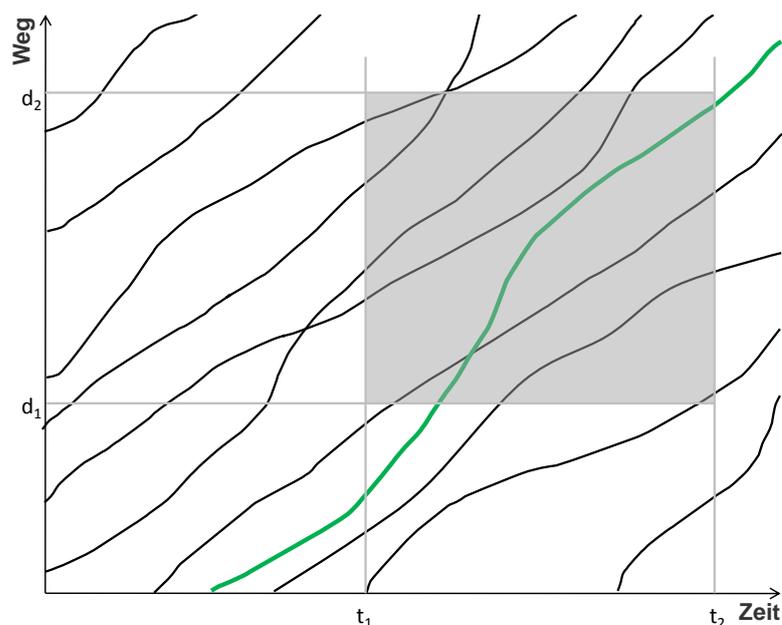


Bild 2.9 Schematische Trajektorie eines Beispielfahrzeugs aus einer Menge von Fahrzeugen. Eigene Darstellung.

schnitten zwischen 0,1 s und 1 s oder ereignisbasiert nur dann, wenn sich ein Wert ändert. In Bild 2.10 ist außerdem der arithmetische Mittelwert \bar{v} dieser Einzelfahrzeuggeschwindigkeit rot eingezeichnet. Die Berechnung dieses Mittelwertes stellt eine Aggregation der ersten Stufe dar. Dies ist für alle aufgezeichneten Kenngrößen jedes Fahrzeugs möglich. Anstatt des Mittelwertes kann, je nach Untersuchungsziel, jeder dieser statistischen Kennwerte zur Aggregation verwendet werden: *Mittelwert*, *Median*, *Standardabweichung* und *Varianz* sowie der *minimale* und *maximale Wert* der Verteilung. So ist beispielsweise über die Standardabweichung der Geschwindigkeit ein Urteil über die Schwankungen in der Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeugs möglich. Pro Fahrzeug, das den räumlich-zeitlichen Auswertungsbereich durchfährt, und pro Aggregationskennwert ergibt sich somit genau ein Wert.

2.6.5.2 Zweite Stufe: Aggregation Fahrzeuggruppe

In der zweiten Aggregationsstufe erfolgt die Zusammenfassung der Ergebnisse aus der ersten Stufe. Die aggregierten Einzelwerte aller Fahrzeuge im Auswertungsbereich werden wiederum statistisch erfasst und können so in einer statistischen Verteilung zur Repräsentation des Gesamtverkehrs dargestellt werden. Bild 2.11 zeigt exemplarisch rote Balken für die Mittelwerte $\bar{v}_{f1..fn}$ aller Geschwindigkeiten der Fahrzeuge $f1..fn$, die jeweils in der ersten Stufe errechnet wurden. Der Mittelwert \bar{v}_n dieser in den roten Balken dargestellten Werte ist dann der Mittelwert für den Gesamtverkehr, der anhand eines grünen Balkens markiert ist. Diese Verteilungen können wiederum über deren charakteristischen Kennwerte beschrieben werden (Mittelwert, Median, Standardabweichung).

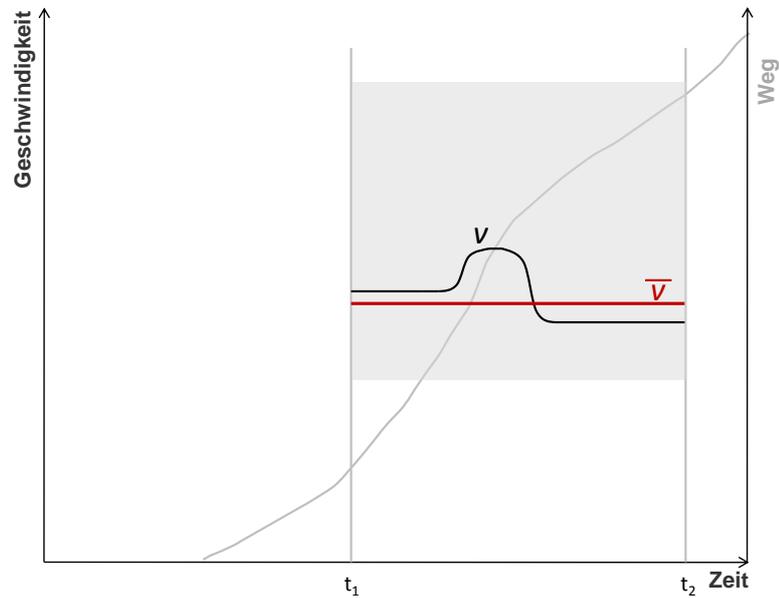


Bild 2.10 Schematischer Verlauf der Geschwindigkeit des Einzelfahrzeugs. Eigene Darstellung.

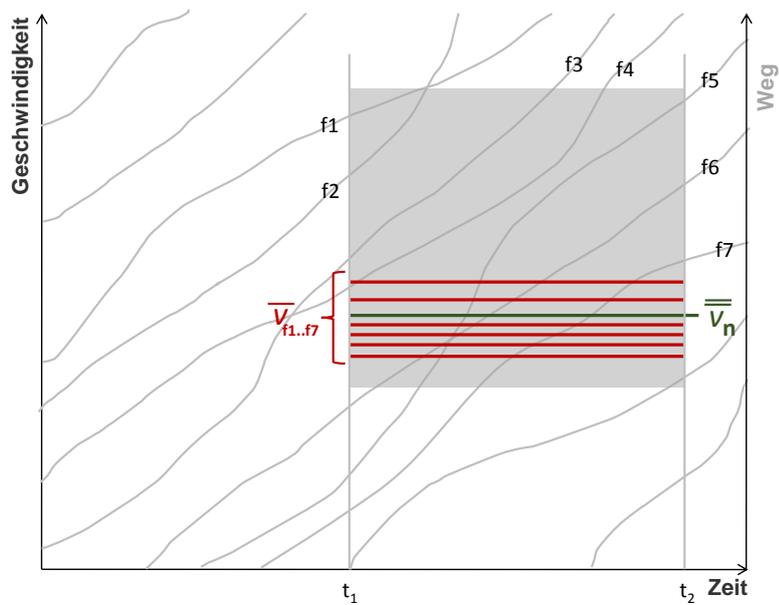


Bild 2.11 Schematische Darstellung mehrerer Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten und des Mittelwertes dieser Mittelwerte. Eigene Darstellung.

2.6.6 Integrierter Ansatz aus dem Projekt sim^{TD}

Ziel des Forschungsprojektes *Sichere Intelligente Mobilität - Testfeld Deutschland* (sim^{TD}) war es, den Reifegrad und die Wirkungen der V2X-Technologie in einem groß angelegten Feldversuch mit 120 Fahrzeugen und parallel in einem aus Fahr- und Verkehrssimulation bestehenden Simulationslabor zu untersuchen (siehe [SIMTD 2008 bis 2013]). Die Projektlaufzeit war von Oktober 2008 bis Juni 2013. Das ausgewählte Versuchsgebiet für den Feldversuch befand sich in Hessen und umfasste neben Abschnitten der Autobahnen A3, A5, A661 und der Bundesstraßen B3 und B455 auch den Frankfurter Stadtteil Niederrad. Insgesamt 33 Funktionen, die auf Fahrzeug-zu-Fahrzeug- oder Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation basieren, wurden sowohl aus technischer Sicht als auch hinsichtlich nicht-technischer Aspekte, d. h. bezüglich Nutzerorientierung und Wirksamkeit im Verkehr, untersucht. Letzteres erfolgte u. a. mittels eines integrierten Ansatzes zur Wirkungsermittlung, den BRAUN ET AL. [2011] und BAUR ET AL. [2012] erläutern. Ein zentraler Bestandteil dieses Ansatzes ist die Hochrechnung der Ergebnisse der Fahrsimulation und des Feldversuchs mithilfe mikroskopischer Verkehrssimulationen, so dass Aussagen zur Wirkung des kooperativen sim^{TD} -Systems auf den Gesamtverkehr getroffen werden können. Ein Nachweis der Wirksamkeit einzelner Funktionen wird von SCHIMANDL ET AL. [2013] beschrieben. Die Funktionen wurden in der Verkehrssimulation nachgebildet und hinsichtlich ihrer Wirkungen auf den Verkehr detailliert ausgewertet.

Das Zusammenspiel der realen Umgebung mit dem Simulationslabor ist in Bild 2.12 illustriert.

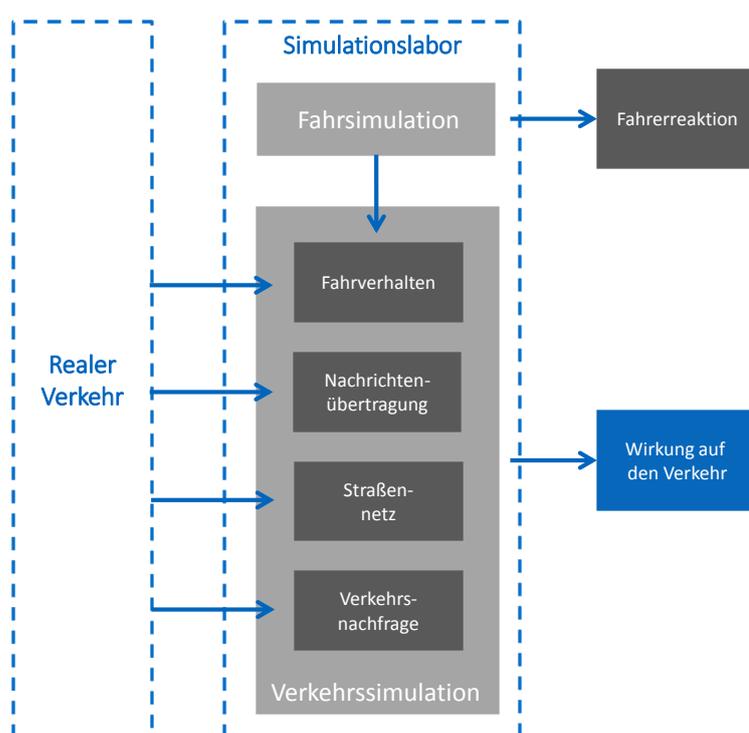


Bild 2.12 Zusammenspiel der Versuchsumgebungen in sim^{TD} . Eigene Darstellung.

2.7 Modellierung von Softwaresystemen

Zentrale Modellierungskonzepte aus dem Software-Engineering, die im Rahmen dieser Arbeit eine wichtige Rolle spielen, sind im Folgenden näher erläutert:

2.7.1 Modellierung in der Softwaretechnik

BRÜGGE UND DUTOIT [2004] beschreiben den Zusammenhang zwischen Softwaretechnik und Modellierung:

„Softwaretechnik ist eine modellierende Aktivität. Sie behandelt Komplexität mit Hilfe von Modellierung, die sich zu einer bestimmten Zeit immer nur auf bestimmte relevante Details konzentriert und alles andere ignoriert. Im Laufe der Entwicklung erstellen Software-Ingenieure verschiedene Modelle des Systems und des Anwendungsbereichs“.

Man erkennt daran, dass Modelle auch im Bereich des Software-Engineering eine zentrale Bedeutung gewonnen haben. Modelle in der Softwaretechnik werden oft nach der Entwicklungsphase und dem Umfeld, in dem sie entstehen, eingeteilt in Domänen- und Software-Modelle:

Domänenmodelle: Domänenmodelle repräsentieren in der Softwaretechnik Darstellungen relevanter Objekte und Systeme, deren Eigenschaften ihrer realen Entsprechung nachempfunden wurden.

Softwaremodelle: Softwarekomponenten, die reale Gegebenheiten nachbilden, können selbst als Softwaremodelle in Form von Programmcode aufgefasst werden.

2.7.1.1 Modellierungssprache UML

Der Beschreibung von Modellen dient immer eine spezifische Notation, Sprache oder Darstellungsform. In der objektorientierten Softwaretechnik hat sich hierbei die Verwendung von Modellierungssprachen durchgesetzt, die speziell für diesen Zweck entwickelt wurden. Der mit Abstand bekannteste und verbreitetste Vertreter ist die *Unified Modelling Language* (UML). UML wurde im Jahr 2001 von der Object Management Group (OMG) entwickelt (siehe [OMG 2001]). UML wurde seither stetig weiterentwickelt und liegt aktuell in der Version 2.4.1 vor (siehe [OMG 2011]).

2.7.2 Ablaufmodellierung mittels Zustandsautomaten

Ein Zustand wird in der theoretischen Informatik beschrieben als eine Menge momentan gespeicherter Werte und Instanzen für bestimmte Variablen und Klassen innerhalb eines abgegrenzten Systems. Ein *Zustandsraum* umfasst alle möglichen Zustände, die in diesem

System vorkommen können. Zwischen den Zuständen sind *Zustandsübergänge* möglich, die durch entsprechende Eingaben ausgelöst werden können. Zustände und deren Übergänge können u. a. mittels endlicher Automaten beschrieben werden. HOPCROFT ET AL. [2002] beschreiben die entsprechenden Konzepte ausführlich. Ein Zustandsautomat kann über folgende Mengen vollständig beschrieben werden:

1. Z: Menge der Zustände,
2. T: Menge der Übergänge zwischen den Zuständen,
3. S: Nicht-leere Teilmenge von Z, die die Startknoten enthält und
4. E: Nicht-leere Teilmenge von Z, die die Endknoten enthält.

Ein typisches Lehrbeispiel für einen Zustandsautomaten ist in Bild 2.13 dargestellt. Es illustriert den vereinfachten Ablauf beim Ticketkauf an einem Fahrkartenautomaten, beispielsweise für eine Bahnfahrt.

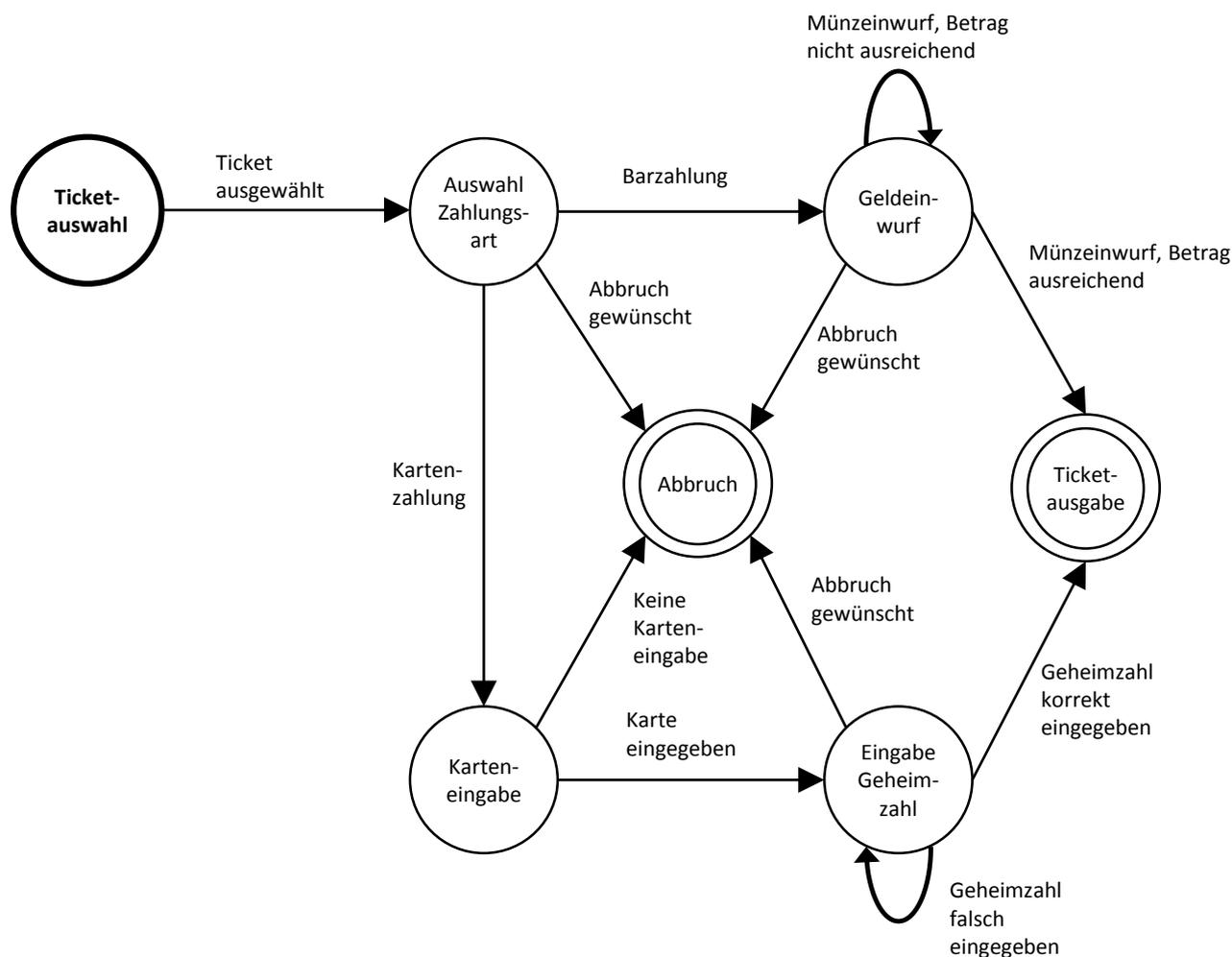


Bild 2.13 Beispielhafte Darstellung eines Zustandsautomaten zur Modellierung eines Fahrkartenautomaten. Eigene Darstellung.

Die Komplexität eines Zustandsautomaten kann mit der Anzahl der Zustände bestimmt werden. Zustandsautomaten werden in der Modellierungssprache UML mithilfe von Zustandsdiagrammen abgebildet. Dies ist eine gängige Methode, Software nach dem Entwurfsmuster *Zustand* (englisch: State Design Pattern) gemäß [GAMMA 2012] zu modellieren.

2.8 Prozessmodelle im Software-Engineering

Prozess- oder auch Vorgehensmodelle sind standardisierte Konzepte zur Definition von Abläufen in Entwicklungsvorhaben im Bereich des Software-Engineering. Ein klassischer Ansatz ist das *Wasserfallmodell*. Es wurde später weiterentwickelt zu einem dynamischeren Vorgehen im *V-Modell*. Beide Modelle sind im Folgenden beschrieben:

2.8.1 Wasserfallmodell

Das Wasserfallmodell, das von ROYCE [1970] erstmals beschrieben wurde, ist die erste Form einer Prozessbeschreibung, die sich als Vorgehensmodell definieren lässt. Es handelt sich dabei um einen sequentiellen Prozess, bei dem alle Aktivitäten der Entwicklung nacheinander abgearbeitet werden. Rückkopplungen zu vorangehenden Phasen sind nicht vorgesehen.

2.8.2 V-Modell

Ein bekanntes und weit verbreitetes Vorgehensmodell ist das V-Modell, das von BOEHM [1979] eingeführt wurde. Es ist in Bild 2.14 dargestellt.

Die wichtigste Eigenschaft des V-Modells ist die Gegenüberstellung verschiedener Prozessstufen in den beiden Phasen „Entwicklung“ und „Verifikation“. Einem iterativer Entwicklungsprozess von der Anforderungsermittlung bis zur Implementierung folgt der Verifikationsprozess, der Test- und Abnahmeaktivitäten für jeweils eine vorangegangene Entwicklungsaktivität definiert.

Seit seiner Entstehung wurde das V-Modell in verschiedenen Stufen weiterentwickelt. Die beiden wichtigsten sind repräsentiert durch das von DRÖSCHEL [2000] erläuterte V-Modell 97 sowie das aktuell u. a. von RAUSCH UND BROY [2006] zur Verwendung empfohlene V-Modell XT (**eXtreme Tailoring**).

2.9 Bestehende Ansätze

Nachfolgend sind Verfahren und technische Hilfsmittel beschrieben, die in bisherigen Studien zur Modellierung Intelligenter Verkehrssysteme zur simulationsbasierten Verkehrswirkungsanalyse verwendet wurden. Teilweise bilden sie die methodische und technische Grundlage für den in Kapitel 3 beschriebenen Modellierungsrahmen.

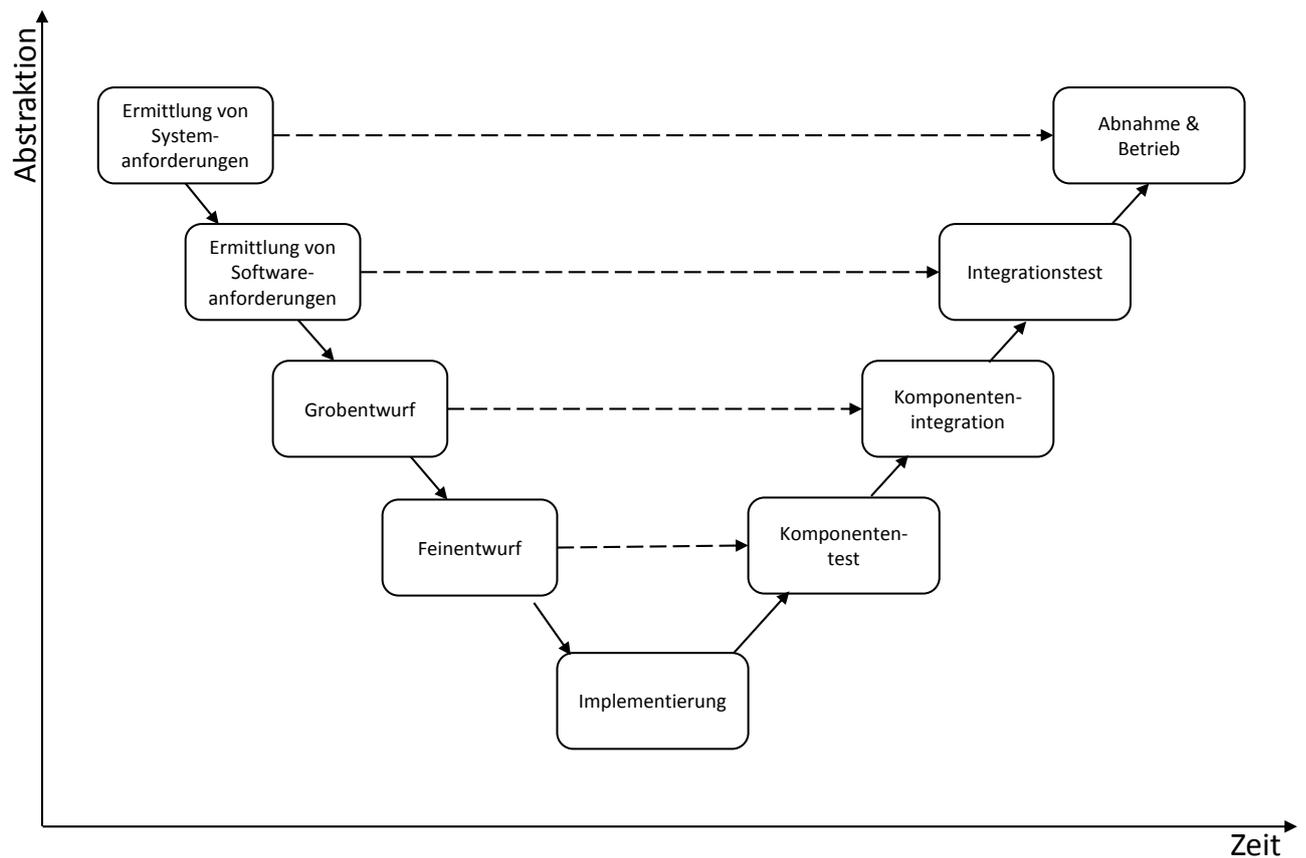


Bild 2.14 Das V-Modell der Softwaretechnik. Eigene Darstellung, angelehnt an [BRÜGGE UND DUTOIT 2004].

2.9.1 Kopplung unterschiedlicher Modellskalen in der Verkehrstechnik

Es bestehen einige Ansätze zur Kopplung verschiedene Skalen der Modellierung, wie sie in Abschnitt 2.4 erläutert wurden, zum Zweck der integrierten, effizienten und umfassenden Analyse ausgewählter Szenarien auf verschiedene Ebenen des Verkehrsablaufs. Zwei Beispiele sind im Folgenden erläutert.

2.9.1.1 AIMSUN als Multiskalensimulator

AIMSUN (**A**dvanced **I**nteractive **M**icroscopic **S**imulation for **U**rban and Non-urban **N**etworks) wird von der Firma TSS in Barcelona, Spanien entwickelt und vertrieben. Es steht hinsichtlich der mikroskopischen Verkehrssimulation in direkter Konkurrenz zu VISSIM. Darüber hinaus bietet AIMSUN jedoch auch ein breites Framework an Simulationsmodellen und -werkzeugen für weitere Modellierungsskalen und für die übergangslose Integration verschiedener Daten. AIMSUN verwendet sowohl das Fahrzeugfolgemodell zur Abbildung des Fahrerhaltens (siehe Abschnitt 2.4.2.2) als auch das Fahrstreifenwechselmodell von Gipps. Die Konzepte, die AIMSUN zugrunde legen, finden sich bei BARCELO ET AL. [1989].

2.9.1.2 MITSIMLab und DynaMIT

Das Simulationspaket MITSIMLab mit dem zugrunde liegenden mikroskopischen MITSIM-Modell wurde im Intelligent Transport Systems Program des Massachusetts Institute of Technology zum Zweck der Analyse von Wirkungen adaptiver Verkehrssteuerungssysteme wie etwa die dynamische Routenführung entwickelt [YANG UND KOUTSOPOULOS 1996].

MEHTA [2001] beschreibt eine Kopplung von MITSIMLab mit dem Softwaremodell DynaMIT (Dynamic Network Assignment for the Management of Information to Travelers), das als Echtzeitsystem zur Berechnung von Routenempfehlungen und zur Verkehrslageprognose von BEN-AKIVA ET AL. [1998] konzipiert und umgesetzt wurde. MITSIMLab spielt dabei die Rolle eines Emulators für eine virtuelle Verkehrszentrale und deckt die mikroskopische Modellierungsskala ab.

2.9.2 Simulatorkopplung zur Untersuchung von V2X-Anwendungen

In den vergangenen Jahren wurden einige Verfahren bei der Untersuchung kooperativer Systeme in der Verkehrssimulation entwickelt. Eine wichtige Fragestellung ist dabei immer die Abbildung der V2X-Nachrichtenübertragung. Detaillierte Erläuterungen zu diesem Sachverhalt sind in Abschnitt 2.5.3 zu finden. Viele Studien basieren auf der Kopplung von Verkehrssimulationsanwendungen mit etablierten Netzwerksimulatoren. Zwei Beispiele dafür sind im Folgenden aufgelistet:

- PARK ET AL. [2011a] koppelten VISSIM mit dem Simulator NCTUns für Netzwerkkommunikation im Fahrzeugumfeld [WANG UND LIN 2008].
- WISCHOFF ET AL. [2003] untersuchten ein kommunikationsbasiertes selbstorganisierendes Verkehrsinformationssystem in einer gekoppelten Simulationsumgebung mit SUMO und dem Netzwerksimulator ns-2.

Zur effizienten Nutzung solcher Kopplungen auch ohne Detailwissen über die teilweise komplexen Programmierschnittstellen der jeweiligen Simulatoren wurden Kopplungs-Frameworks entwickelt, die eine nahtlose Integration von Verkehrs- und Kommunikationssimulatoren ermöglichen. Zwei Beispiele dafür sind die beiden folgenden:

- SCHÜNEMANN [2011] beschreibt das Framework *VsimRTI*, das die Kopplung und Synchronisation von SUMO und ansatzweise auch VISSIM mit den Netzwerksimulatoren ns-3 [HENDERSON ET AL. 2008], OMNeT++ [VARGA ET AL. 2001], JiST/SWANS [BARR UND HAAS 2005] und VSimRTI-cell ermöglicht.

- *iTetris*, beschrieben von KUMAR ET AL. [2010], entstand im gleichnamigen EU-Projekt und definiert eine Architektur zur Verbindung verschiedener Komponenten im Bereich der Simulation Intelligenter Verkehrssysteme.

2.9.3 Bestehende Verfahren zur Systemmodellbildung

Dieser Abschnitt erläutert, mit welchen technischen und methodischen Mitteln übliche Untersuchungen zu Systemwirkungen im Bereich von Verkehrs- und Fahrzeugsystemen durchgeführt werden. Zu beachten ist dabei, dass meist nicht notwendigerweise Wirkungen der Systeme auf den Gesamtverkehr im Vordergrund stehen.

2.9.3.1 Implementierung von Systemmodellen in MATLAB / Simulink

Geläufige Verfahren zum Test linearer und nicht-linearer dynamischer Systeme nutzen die Simulation mittels MATLAB und ihrer Erweiterung Simulink von der Firma *The MathWorks*. Anwendungsorientierte Beschreibungen finden sich in [HOFFMANN 1998] und [PIETRUSZKA 2006]. Während MATLAB hauptsächlich für numerische Berechnungen mittels Matrizen ausgelegt ist, bietet Simulink zusätzlich grafische Funktionalitäten zur Modellierung dynamischer Systeme. In Form von Blöcken werden Modellkomponenten gebildet und parametrisiert und in geeigneter Form miteinander verknüpft. Auf diese Weise ist eine anschauliche Modellierung komplexer Systeme möglich. Insbesondere ist Simulink in der Lage derartig implementierte Modelle zeitgesteuert zu simulieren und bietet Möglichkeiten zur automatisierten Verifikation und Validierung an. MATLAB / Simulink enthält spezifische Notationen und eine proprietäre Programmiersprache. Modellimplementierungen können allerdings auch in andere Sprachen übersetzt werden. C-Funktionen können direkt aufgerufen werden. Eine Integration in externe Tools ist mittels entsprechender Schnittstellen möglich.

Auch im Zusammenhang mit der Modellierung von Verkehrs- und insbesondere Fahrerassistenzsystemen ist Simulink ein häufig verwendetes Werkzeug. Beispielhaft erwähnt seien LAQUAI ET AL. [2011], die den Einfluss von Fahrerverhalten als Reaktion auf die Ausgabe von Fahrerassistenzsystemen analysieren, und SCHICK ET AL. [2008], die die resultierende Fahrdynamik als Ergebnis der Ausgabe eines Fahrerassistenzsystems in einer Simulink-Simulation untersuchen.

2.9.3.2 Systemsimulation: ViL, HiL und SiL

Ein großer Teil der aktuellen Entwicklungsaktivitäten bei den Automobilherstellern findet im Bereich elektronischer Assistenzsysteme im Fahrzeug statt. Hierzu werden Algorithmen und Integrationskonzepte entworfen, mithilfe derer Assistenzsysteme zu Erhöhung des Fahrkomforts oder der Fahrersicherheit implementiert und in die Gesamtarchitektur des

Fahrzeugs integriert werden. Das Umfeld der fahrzeugbasierten Technologien stellt hohe Anforderungen an Sicherheit und Zuverlässigkeit der Systeme im Fahrzeug. Da jede Instanz solcher Hard- und Softwarekomponenten nur jeweils einmal pro Fahrzeug installiert wird, sind die Anforderungen an die Skalierbarkeit derartiger Anwendungen verhältnismäßig gering. Zur Systementwicklung im Fahrzeugumfeld existieren standardisierte Softwareframeworks. Sehr verbreitet ist dabei AUTOSAR (AUTomotive Open System ARchitecture), das in [KINDEL UND FRIEDRICH 2009] ausführlich beschrieben ist.

Zum Test der korrekten Funktionalität und der Zuverlässigkeit derartiger Systeme finden bei den Herstellern Simulationen statt. Einzelne Fahrzeuge oder auch einzelne entwickelte Hard- oder Softwarekomponenten werden dabei mittels Systemschnittstellen an spezielle Simulationsumgebungen angekoppelt, die verschiedene Umgebungsbedingungen simulieren können. Dabei handelt es sich um die drei Konzepte

- Vehicle-in-the-Loop (ViL)
- Hardware-in-the-Loop (HiL)
- Software-in-the-Loop (SiL)

SCHICK ET AL. [2008] erläutern entsprechende Simulationsmethoden; OTTERBACH UND SCHÜTTE [2004] beschreiben darüber hinaus Verfahren unter Verwendung der verbreiteten Simulationsumgebung dSPACE. Im Bereich der Verkehrstechnik hat HOYER [2012] eine kooperative Lichtsignalanlage in eine virtuelle Verkehrsumgebung eingebunden um Wirkungen des Fahrerverhaltens bei Nutzung eines solchen Systems zu evaluieren. Die Integration wurde dort *DiL* (Devices-in-the-Loop) genannt.

2.9.4 Softwarebasierte Modellierungsframeworks in anderen Fachdisziplinen

Die Grundidee der systematischen Modellentwicklung und -implementierung besteht bereits in verschiedenen Fachbereichen, die auf modellbasierte Analysen zurückgreifen und auf eine effiziente Generierung von Szenarien, die Kopplung von Modellkomponenten und/oder eine strukturierte Implementierung angewiesen sind. An dieser Stelle sollen zwei Beispiele aufzeigen, welchen Zweck diese konkret erfüllen und wie sie entstanden sind.

2.9.4.1 Earth System Modeling Framework

Das Earth System Modeling Framework (ESMF) ist ein Rahmenwerk zur softwareseitigen Modellierung von Klima, Wetter und verwandten Phänomenen, die die Erde beeinflussen. Es basiert auf der Kopplung verschiedener relevanter Komponenten, die jeweils physikalische Elemente wie etwa die Atmosphäre oder Ozeane repräsentieren. Zu diesem Zweck werden

standardisierte Schnittstellen in den Programmiersprachen Fortran 90 und C/C++ angeboten. Das ESMF entstand ursprünglich aus einer Absichtserklärung der Common Modeling Infrastructure Working Group (CMIWG) unter Führung der NASA, nachdem in mehrjähriger Gremienarbeit der Bedarf für eine standardisierte Modellierung der Erde und zentraler Einflussfaktoren festgestellt wurde [HILL ET AL. 2004].

2.9.4.2 CompuCell

Das Modellierungsframework CompuCell wurde von SWAT ET AL. [2012] zur dynamischen Beschreibung von organischen Zellen und deren Interaktionen in biologischem Gewebe und Organismen mittels genetischen Zellmechanismen entworfen. Es ermöglicht hochskalierbare Simulationen von Gewebestrukturen und damit die Beobachtung und Prognose der Entwicklung von Gewebeveränderungen und Krankheiten durch komplexe Zelldynamik.

3 Modellierungsrahmen zur Simulation von IVS

Der Kern dieser Arbeit besteht in der Bereitstellung eines Modellierungsrahmens für Intelligente Verkehrssysteme. Er wird in diesem Kapitel erläutert und lässt sich in drei Aspekte einteilen:

1. Prozessmodell	Definition eines Modellierungsprozesses, der sich an einen Entwicklungsprozess im Software-Engineering anlehnt. Die Schwerpunkte liegen jedoch auf den wichtigen Arbeitsschritten im Rahmen der Modellbildung in der Wissenschaft: Modellspezifikation, Modelloptimierung, Modellimplementierung und Modellvalidierung.
2. Softwareframework	Vorgefertigte Software-Rahmenkomponenten, die für die Entwicklung künftiger Modelle im Bereich Intelligenter Verkehrssysteme genutzt werden können. Zentral ist dabei eine Rahmenapplikation, die üblicherweise benötigte Funktionalitäten, wie Datenzugriff aus simulierten Fahrzeugen, bereitstellt und geeignete Datenstrukturen effizient nutzt.
3. Analysemethodik	Vorschlag einer Methodik und Bereitstellung entsprechender Softwarekomponenten für die Durchführung von Sensitivitätsanalysen mit Bezug auf Verkehrswirkungen zur Modell- und Funktionsoptimierung sowie zur Validierung und Wirkungsanalyse der modellierten Systeme.

Tabelle 3.1 Zentrale Komponenten des Modellierungsrahmens

Der Ablauf des Modellierungsprozesses ist in Bild 3.1 illustriert.

Ausgangspunkt der beschriebenen Modellentwicklung ist die Ermittlung der Ziele, die mit der Verkehrssimulation der zu modellierenden Komponenten erreicht werden sollen. Speziell sind dabei Fragen zu beantworten, die die zu erwartenden Wirkungen sowie die Situationen, in denen diese Wirkungen auftreten können, betreffen. Die Beantwortung dieser Fragen führt zum Umfang und der benötigten Tiefe der Modellierung. Das Rahmenwerk stellt für die Spezifikation des dynamischen Ablaufs innerhalb der Systemmodelle Leitlinien auf Basis von Zustandsautomaten bereit. Diese bieten eine konkrete Grundlage für die Modellimplementierung und -optimierung. Nachdem ein Systemmodell auf Grundlage der so definierten Spezifikation umgesetzt wurde, ist ein iterativer Optimierungs- und Validierungsprozess vorgesehen, der auf dem Konzept der Sensitivitätsanalysen aus der Statistik basiert. Sobald ein validiertes und optimiertes Modell vorliegt, kann dieses an konkrete Verkehrssimulationsumgebungen angebunden und dort zur Analyse der Wirkungen auf den Verkehr simuliert werden. Zu diesem Zweck stellt das Framework Adapter zur Generalisierung der Modellintegration zur Verfügung.

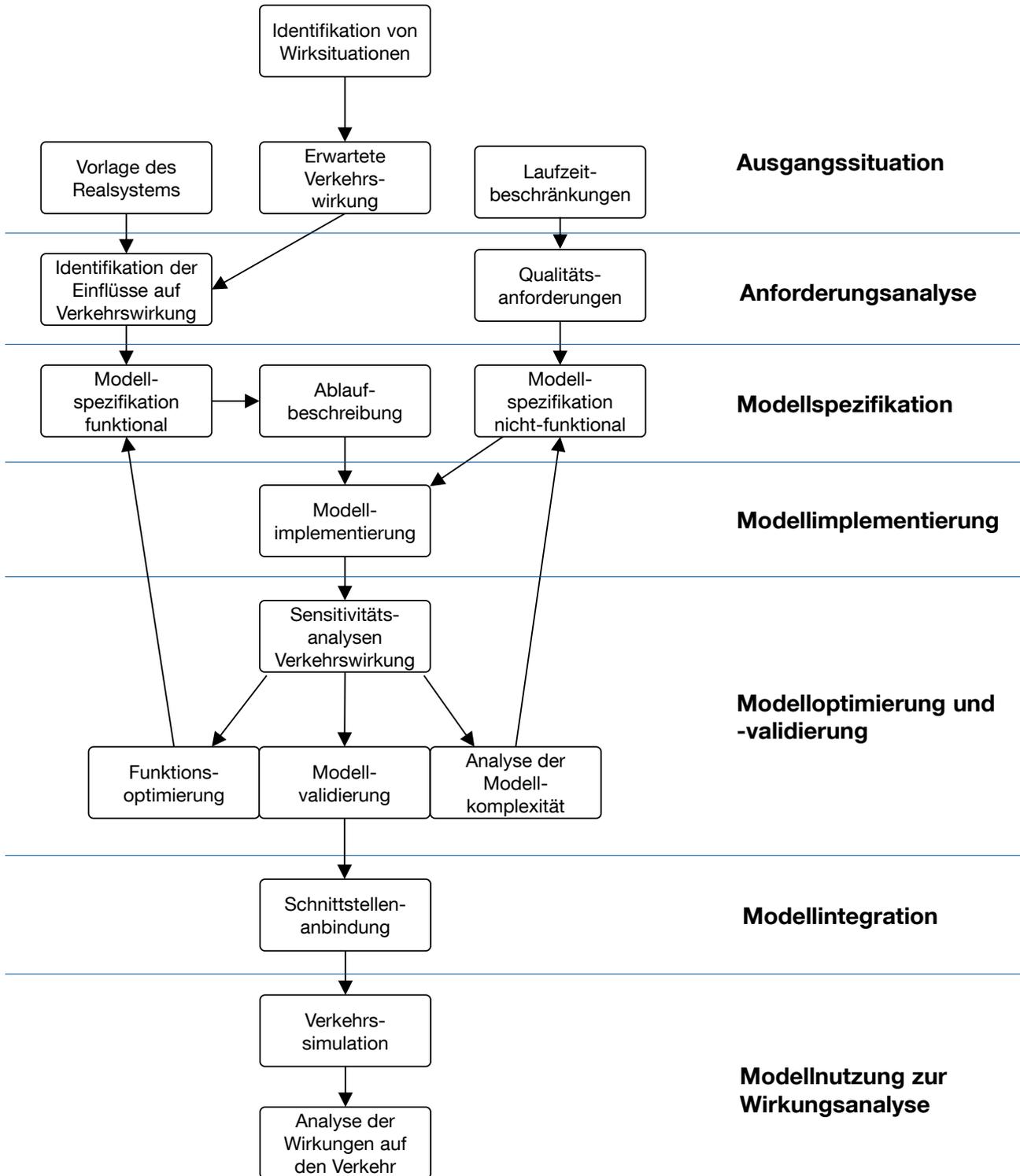


Bild 3.1 Ablaufdarstellung des entwickelten Modellierungsprozesses

Alle beschriebenen Komponenten sind in das Softwareframework vtSim (siehe Abschnitt 3.2) eingebunden und erlauben damit einen strukturierten und effizienten Prozess, dessen Komplexität vom Benutzer an das Framework abgegeben wird. Wichtige Eigenschaften des Softwarerahmens sind insbesondere folgende:

- Er ist vollständig generisch, d. h. Simulationsstudien sind nicht an eine konkrete Simulationssoftware und deren Schnittstellen gebunden. Eine einzige Implementierung einer Applikation kann in verschiedenen Umgebungen genutzt werden.
- Er ist modular und flexibel, d. h. vorgefertigte Basiskomponenten können beliebig genutzt und kombiniert werden.

In diesem Kapitel werden darüber hinaus wichtige Überlegungen dargelegt, die bei einer sinnvollen Konfiguration von Modellierungsprozessen und Simulationsstudien relevant sind:

- Auswahl des räumlichen und zeitlichen Untersuchungsbereiches.
- Auswahl eines geeigneten Straßennetzes für die Modellierung und Simulation spezifischer Intelligenter Verkehrssysteme.
- Einschätzung der benötigten Genauigkeit der Modellierung hinsichtlich der Regelstrategie und der zeitlichen Auflösung bei der Simulation.

Im Anschluss an die Definition des Modellierungsrahmens erfolgt in Kapitel 4 eine Referenzstudie, die das Vorgehen und einige der vordefinierten Software-Rahmenkomponenten aufgreift und die Nutzung des Frameworks anhand einer konkreten Anwendung beschreibt. Dort ist auch erläutert, wie Modellierungsprozess und Wirkungsanalyse in der zentralen Sensitivitätsanalyse miteinander verknüpft werden können.

3.1 Randbedingungen und Abgrenzung

Zur simulationsbasierten Wirkungsanalyse im Verkehr sind grundsätzlich einige Randbedingungen zu beachten und einzuhalten. Auch wenn die Systementwicklung an sich mithilfe des in dieser Arbeit vorgestellten Ansatzes entkoppelt werden kann von der zugrunde liegenden Simulationssoftware, so muss diese einige grundlegende Voraussetzungen erfüllen:

1. Die Abläufe innerhalb der Modelle und Simulationen sind zeitdiskret.
2. Die Abläufe innerhalb der Modelle und Simulationen sind ortsdiskret.
3. Der zeitlich-räumliche Bereich der Untersuchungen kann eindeutig abgegrenzt werden.

4. Es stehen umfassende Programmierschnittstellen zu Verfügung, die zur Laufzeit den Abruf aller relevanter Informationen und die Beeinflussung von simulierten Fahrzeugen ermöglichen. Eine entsprechende Schnittstellendefinition findet sich in Anhang A.

3.1.1 Abgrenzung von der Entwicklung realer Fahrzeugsysteme

Im Rahmen dieser Arbeit steht die simulationsbasierte Wirkungsanalyse im Verkehr im Vordergrund. Entwicklungsprozesse und -anforderungen von Fahrzeugsystemen in der Realität spielen dabei eine untergeordnete Rolle. Die Sicherheit einzelner Fahrer sowie die Zuverlässigkeit und minimale Fehlertoleranz zur Sicherstellung der Akzeptanz solcher Systeme sind in der virtuellen Simulationsumgebung nur am Rande relevant. Da hier hingegen eine große Zahl von Fahrzeugen (in typischen Simulationen bis zu mehreren Tausend) mit entsprechenden Systemmodellen ausgestattet werden soll, ergeben sich höhere Anforderungen an die Effizienz der Implementierung und damit an die algorithmische Laufzeitkomplexität sowie an den Speicherbedarf der Systemmodelle.

3.1.2 Abgrenzung von der Modellierung des Fahr(er)verhaltens

Ein großer Teil der modernen Intelligenzen Verkehrssystemen stellt einer Menge von Fahrern und Fahrzeugen Informationen mittels Infrastruktureinrichtungen, wie etwa Lichtsignalen oder dynamischen Verkehrszeichen, oder Anzeigen im Fahrzeug zur Verfügung. Die Fahrerinformationen im Fahrzeug werden auf einem Display angezeigt, das Mensch-Maschine-Interface (MMI) oder *Human-Machine-Interface* (HMI) genannt wird. Eine solche Information kann eine Empfehlung (beispielsweise für eine Umleitung oder Geschwindigkeitsanpassung) oder auch Warnung vor einem kritischen Ereignis sein. Ziel der Fahrerinformation oder -warnung ist immer eine Verhaltensänderung, um die Sicherheit oder die Effizienz einer bestimmten Verkehrssituation zu erhöhen. Die Verhaltensänderung besteht entsprechend Abschnitt 2.1.7 aus der Änderung der Längsbeschleunigung, des Fahrstreifens oder der Fahrtroute. Entscheidend für die Nachbildung der Beeinflussung und Wirkung dieser Systeme in der Verkehrssimulation ist daher ein umfassendes Verständnis und eine realitätsnahe Modellierung solchen Fahr(er)verhaltens, das sich als Reaktion auf eine Information oder Warnung einstellt. In dieser Arbeit wird kein neues Verfahren für die Fahrverhaltensmodellierung entwickelt, sondern das von HOFFMANN [2013] entwickelte und im Projekt sim^{TD} erfolgreich angewandte Konzept verwendet.

3.1.3 Synchronisation und Skalierung

Eine Skalierung von Modellebenen besteht beispielsweise in der Aggregation einzelner Modellelemente, im vorliegenden Fall etwa das Zusammenspiel von Systemkomponenten

eines Fahrzeugs im Gesamtfahrzeug, und in einem weiteren Schritt die Aggregation der Menge mehrerer einzelner Fahrzeuge zu einem Fahrzeugpulk. Zur Synchronisation der einzelnen Modellskalen sind Mechanismen zu entwickeln, die nach Möglichkeit eine jeweils abstraktere Skala aktivieren und gleichzeitig speichereffizient den Zustand der jeweils detaillierteren Ebene erfassen und weiterführen. So lösen definierte Ereignisse, wie etwa die Erkennung einer kritischen Situation für ein einzelnes Fahrzeug durch einen Fahrzeugsensor, die Auflösung einer Pulkbetrachtung auf und bedingen die detaillierte individuelle Betrachtung des betroffenen Fahrzeugs. Bild 3.2 illustriert den Ablauf einer synchronisierten Multiskalensimulation.

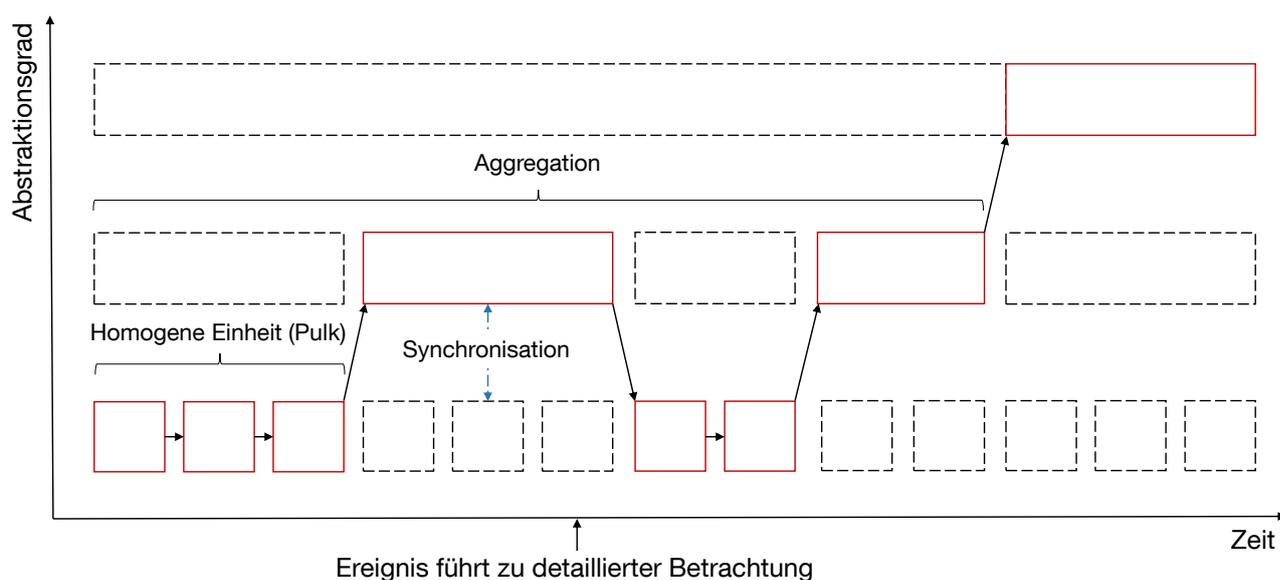


Bild 3.2 Schematische Darstellung des Ablaufs einer Multiskalensimulation. Eigene Darstellung.

3.1.4 Einordnung in IVS-Rahmenarchitekturen

In der Europäischen Kommission bestehen Bestrebungen, Systemarchitekturen im Umfeld Intelligenter Verkehrssysteme zu vereinheitlichen. BELINOVA ET AL. [2010] erläutern diese ausführlich.

Grundsätzlich erfolgt mithilfe einer solchen Architekturperspektive eine Einteilung Intelligenter Verkehrssysteme in eine funktionale, eine technische und eine organisatorische Kategorie. Eine Übertragung dieser Perspektive auf den in dieser Arbeit vorgestellten Modellierungsrahmen ist denkbar auf Basis der in Tabelle 3.2 vorgenommenen Einteilung.

3.2 Simulationsframework vtSim

In diesem Abschnitt wird das Simulations- und Analyseframework *vtSim* erläutert, das zur Automatisierung und effizienten Verarbeitung von Simulations-, Datenaufbereitungs- und

Architekturebene	Komponente des Modellierungsrahmens
Organisatorisch	Prozessmodell
Technisch	Softwareframework
Funktional	Analyse von Wirkungen auf den Verkehr

Tabelle 3.2 Mögliche Einordnung des Modellierungsrahmens in gängige Architekturebenen für IVS. Analyseabläufen am Lehrstuhl für Verkehrstechnik der Technischen Universität München entwickelt wurde.

3.2.1 Motivation

Vor dem Hintergrund der großen Menge komplexer Daten und Komponenten, die zur Simulation von Verkehrssystemen in Simulationen benötigt und genutzt werden, wurde der Bedarf für ein flexibles und effizientes Werkzeug identifiziert, das verschiedene Arten von verkehrsbezogenen Daten einlesen, konvertieren, simulieren, analysieren und visualisieren kann. Aus diesem Grund ist in den vergangenen Jahren am Lehrstuhl für Verkehrstechnik das Simulationsframework *vtSim* entstanden, dessen Konzeption in [BAUR ET AL. 2010] ausführlich beschrieben ist. Teile davon wurden im Rahmen dieser Arbeit entwickelt.

3.2.2 Einsatzmöglichkeiten

vtSim kann folgende Daten- und Verfahrensarten effizient verarbeiten:

- Verkehrsmengen,
- Digitale Karten,
- Physikalische Modelle (z. B. Fahrzeug mit Verbrennungsmotor, Elektrofahrzeug, Straßenbahn, Fußgänger, Radfahrer etc.),
- Modelle von Kommunikationstechnologien,
- Psychologische Kenntnisse zum Verhalten der Verkehrsteilnehmer.

Durch Parallelisierung, systematische Kopplung und ein hohes Maß an Automatisierung entfällt ein maßgeblicher Teil des Ressourceneinsatzes bei der Simulationskonfiguration durch die Nutzung des Werkzeugs. Umfassende und aussagekräftige Ergebnisse können mit verhältnismäßig geringem Aufwand gewonnen werden. Auch für Simulationsstudien im kleineren Rahmen, zum Beispiel zur Untersuchung des zeitlich und räumlich begrenzten Einflusses von geplanten verkehrsbeeinflussenden Maßnahmen, wie etwa einer temporären Seitenstreifenfreigabe oder der Installation eines neuen Verkehrsleitsystems, ermöglicht *vtSim* damit einen effizienten und wissenschaftlich abgesicherten Analyseprozess.

3.2.3 Systemarchitektur

Die Architektur von vtSim besteht konkret aus folgenden Komponenten:

- Szenariomanager zur Spezifikation verschiedener Randbedingungen im Verkehr sowie Parameterkonfigurationen, aus denen verschiedene Szenarien entstehen,
- Standardisierter Import von verkehrsbezogenen Daten,
- Ergebnisdatenaufbereitung und statistische Analyse inkl. Ausgabe umfangreicher tabellarischer und grafischer Analyseergebnisse,
- Anbindung und automatisierte Ausführung verschiedener Simulationstools,
- 3D-Visualisierung des Simulationsablaufs (*vtSim.VIEW*),
- Eine Benutzeroberfläche zur Begleitung des Workflows,
- Generische Anbindung externer verkehrsbeeinflussender Systeme. Dies betrifft die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Komponenten.

Das Gesamtkonzept der integrierten modularen Simulationsarchitektur von vtSim ist anhand des Architekturbilds in Bild 3.3 dargestellt.

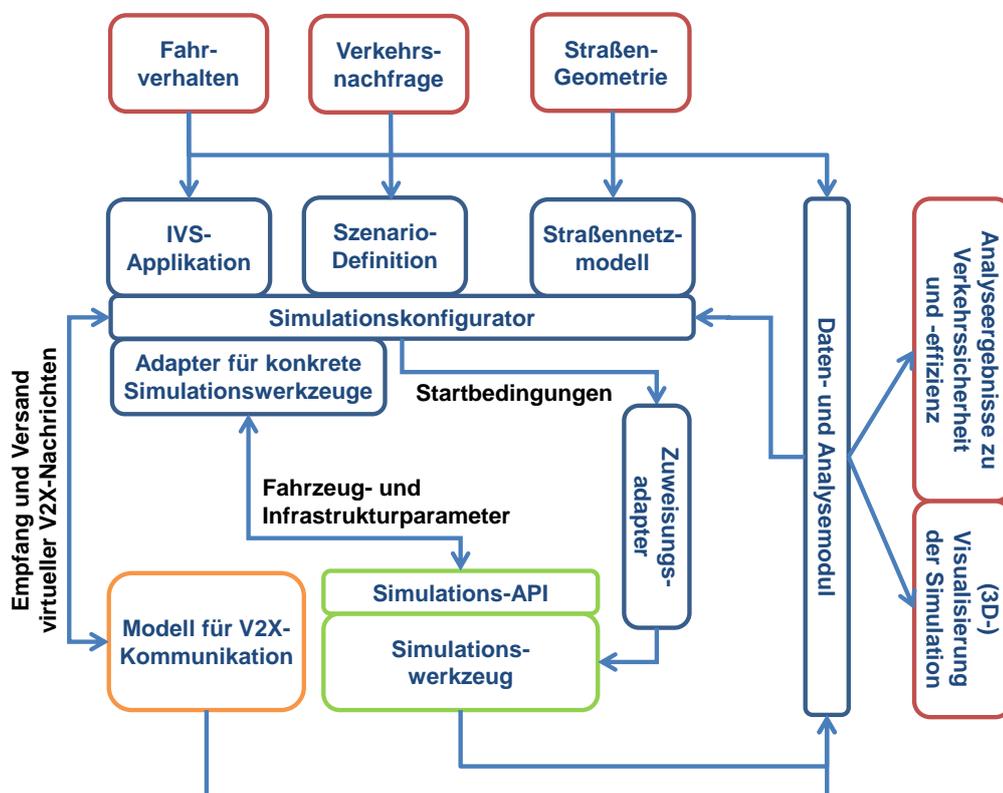


Bild 3.3 Schematische Darstellung der Architektur des Simulationsframeworks vtSim. Veröffentlicht u. a. von BAUR ET AL. [2014].

3.3 Softwareframework zur Modellierung von IVS

Einer der drei Teilaspekte des Modellierungsrahmens stellt die Bereitstellung einer technischen Rahmenarchitektur für die Modellierung Intelligenter Verkehrssysteme dar.

Bild A.1 und Bild A.2 in Anhang A zeigen die nutzbaren Klassen der Applikationskomponente mit ihren Methoden und Variablen sowie Schnittstellen zur Implementierung von Applikationsmodellen, die an das Simulationsframework angebunden werden sollen. Alle hier vorgestellten Komponenten wurden im Zuge dieser Arbeit in das vtSim-Gesamtsystem integriert. Die Zusammenhänge der relevanten Komponenten sind im Architekturbild des Frameworks in Bild 3.4 auf abstrakter Ebene illustriert.

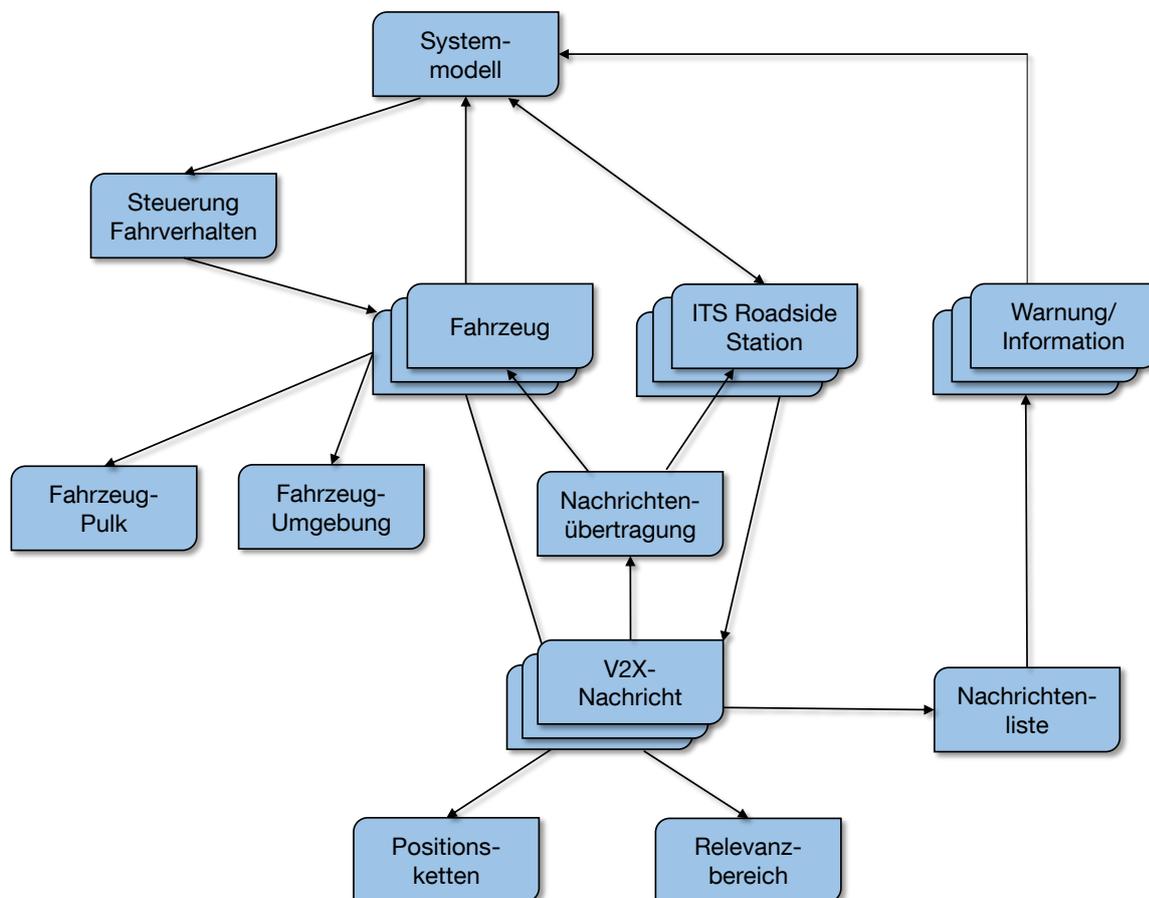


Bild 3.4 Darstellung der Zusammenhänge der relevanten Komponenten des Frameworks. Eigene Darstellung.

Die technische Architektur des Frameworks ist im UML-Klassendiagramm in Bild 3.5 dargestellt. Die einzelnen Klassen und Komponenten werden in den nachfolgenden Abschnitten detailliert erläutert.

3.3.1 Softwarekomponenten zur Applikationsmodellierung

Im Folgenden sind die Softwarekomponenten beschrieben, die zur Nutzung innerhalb des Modellierungsprozesses angeboten werden. Die Implementierung der Komponenten erfolgte

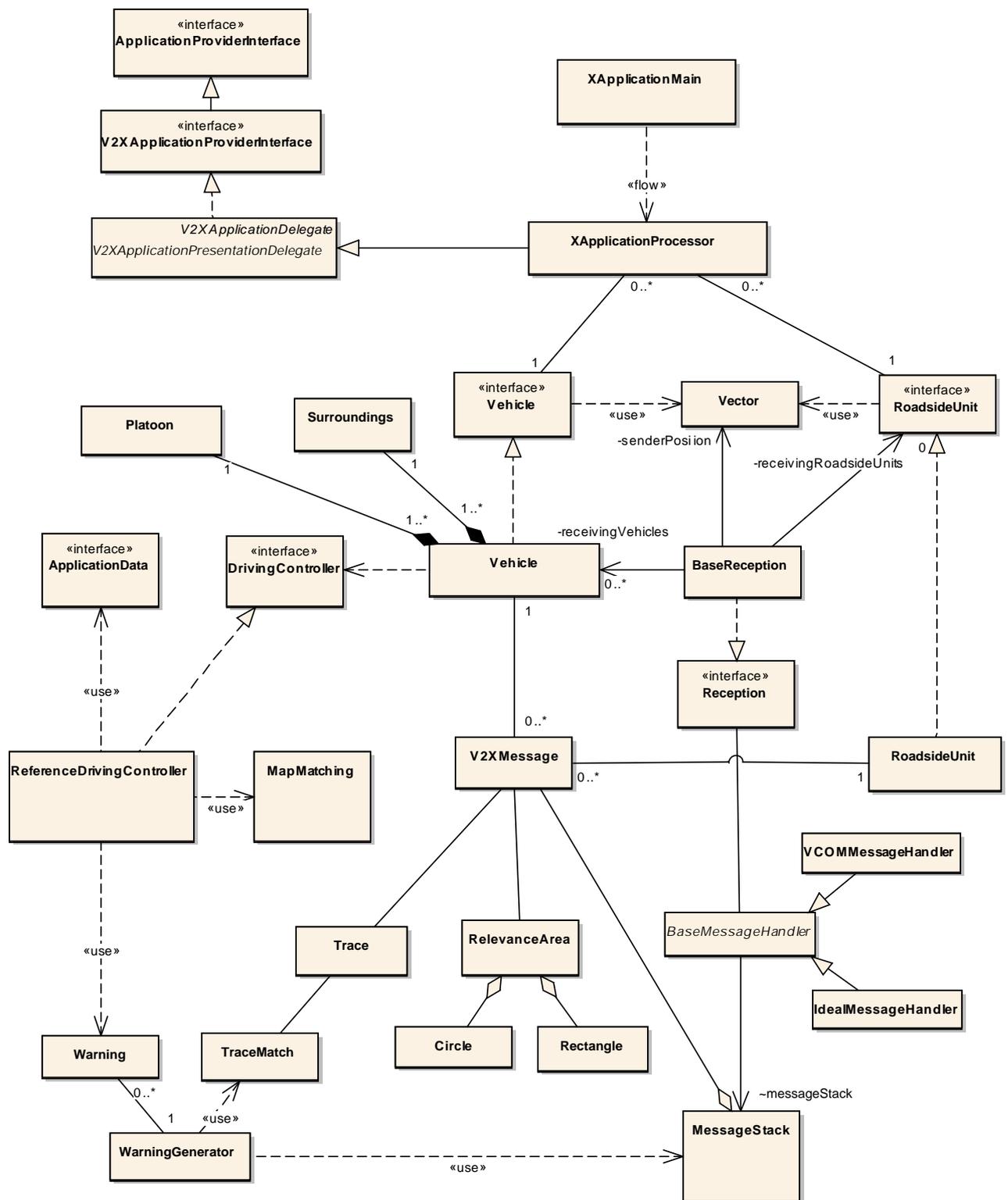


Bild 3.5 Gesamtarchitektur des technischen Modellierungsrahmens im UML-Klassendiagramm

in der Programmiersprache Java unter Nutzung des Java Plugin Frameworks (JPF, siehe [OLSHANSKY 2007]) zur Einbindung in vtSim.

3.3.1.1 Simulations-Delegator (*V2XApplicationDelegate*)

Der Simulations-Delegator bildet die abstrakte Basisklasse jeder Applikation. Sie enthält grundlegende Methodenschnittstellen zum Abrufen relevanter Informationen, wie etwa aller aktuell im Simulationsnetz befindlicher Fahrzeuge und zur Beeinflussung dieser Fahrzeuge. Er muss mittels Vererbung erweitert werden zu einem konkreten Applikations-Prozessor (siehe Abschnitt 3.3.1.2). Die Aufrufe in diesem Prozessor werden dann weitergeleitet an den vorkonfigurierten Adapter zu einer konkreten Simulationsanwendung (siehe Abschnitt 3.3.3). Dabei wird das Softwareentwicklungsmuster *Delegate* genutzt, das die Delegation von generischen Operationen an konkrete Implementierungen erlaubt. GAMMA [2012] erläutert es ausführlich.

3.3.1.2 Applikationsausführung und Datenbereitstellung (*XApplicationProcessor*)

Die softwaretechnische Grundlage für die Implementierung des Applikationsmodells selbst besteht in der konkreten Klasse *XApplicationProcessor*, wobei das *X* hier für den Namen der Applikation steht. Sie nutzt die Basisfunktionalität für Systemmodelle von Verkehrssystemen, die an die Verkehrssimulation angebunden werden sollen. Von zentraler Bedeutung ist darin die seitens der Schnittstelle aus dem Simulations-Delegator zu implementierende Methode *processStep()*. Sie wird in jedem Simulationszeitschritt aufgerufen und führt alle in diesem Zeitschritt relevanten Operationen aus oder delegiert sie an die Simulationsanwendung. Der Aufruf von *processStep* wird in der Regel durch die Simulationsanwendung selbst angestoßen. Im Fall von *VISSIM* erfolgt dies beispielsweise, indem in der *VISSIM*-seitigen Schnittstellenmethode *processTimeStep()* die vtSim-Methode *processStep()* aktiv aufgerufen wird. In anderen Simulationswerkzeugen wie *SUMO* oder *AIMSUN* ist das analog möglich. Falls die Simulationsanwendung einen solchen Aufruf nicht anbietet, kann er auch durch den Applikationsentwickler mithilfe externer Trigger (Auslöser) nachgebildet werden. Folgende grundlegende und wiederkehrende Operationen sind in einer Beispielapplikation vorgegeben:

- Zugriff auf eine Hashtabelle vom Java-Typ *HashMap*, die in jedem Zeitschritt mit Objekten vom Typ *Vehicle* befüllt wird, welche genau die Fahrzeuge repräsentieren, die in diesem Moment in der Simulation aktiv sind,
- Identifikation des vorausfahrenden Fahrzeugs,
- Berechnung des Nettoabstands zwischen zwei Fahrzeugen (siehe Abschnitt 2.6.4),

- Berechnung von Distanzen zwischen zwei Fahrzeugen oder zwischen zwei beliebigen georeferenzierten Punkten im Netzmodell,
- Generierung und Verarbeitung von Positionsketten (siehe Abschnitt 3.3.1.6),
- Speicherung und Abruf von Zusammenhangslisten für Fahrzeugpuls (siehe Abschnitt 3.3.1.4).

3.3.1.3 Datenobjekt für Fahrzeuginformationen (*Vehicle*)

Zur Speicherung von momentanen Belegungen dynamischer Variablen, wie z. B. der Fahrzeugposition und -geschwindigkeit (vollständige Auflistung der Variablen siehe Anhang A) und zur Beeinflussung des Zustands einzelner Fahrzeuge in der Verkehrssimulation dient die Klasse *Vehicle*, die von konkreten Simulationsanwendungen mittels der Adapterfunktionalität, die in Abschnitt 3.3.3 beschrieben ist, befüllt werden kann.

3.3.1.4 Zusammenhangskomponente (*Platoon*)

Neben grundlegenden Fahrzeuginformationen ist in der Applikationskomponente insbesondere auch jeweils ein Attribut für das vorausfahrende (*leadingVehicle*) und das nachfolgende (*trailingVehicle*) Fahrzeug vorgesehen. Diese beiden Informationen können im Kontext genutzt werden, um implizite linear verkettete Listen für Fahrzeugpuls zu repräsentieren. Diese Listen sind für eine effiziente Verarbeitung von Fahrzeuginteraktionen hilfreich. Dazu ist eine Definition notwendig, in welcher Entfernung ein Fahrzeug frühestens ein anderes als vorausfahrendes Fahrzeug erkennt. In Simulationsanwendungen wie VISSIM wird in der Standardeinstellung ein Wert von 250 m als maximale Entfernung angenommen, in der ein Fahrer ein vorausfahrendes Fahrzeug wahrnehmen kann. Die Zusammenhangskomponente übernimmt in der Standardkonfiguration die Angabe für potentiell vorausfahrende Fahrzeuge aus der zugrunde liegenden Simulationsanwendung. Es besteht die Möglichkeit, hier eine entkoppelte Konfiguration vorzunehmen.

Bei einem Fahrstreifenwechsel ist für den Zusammenhang entscheidend, auf welchem Fahrstreifen sich das wechselnde Fahrzeug aus technischer Sicht befindet. Dies kann sich in verschiedenen Simulationsanwendungen unterscheiden. In der Regel ist die relevante Position die Vorderkante des Fahrzeugs. Sobald diese den neuen Fahrstreifen erreicht hat, wird das Fahrzeug auf diesem neuen Fahrstreifen verortet.

Bild 3.6 veranschaulicht einige beispielhafte Zusammenhangslisten auf einem Streckenabschnitt in der Simulation.

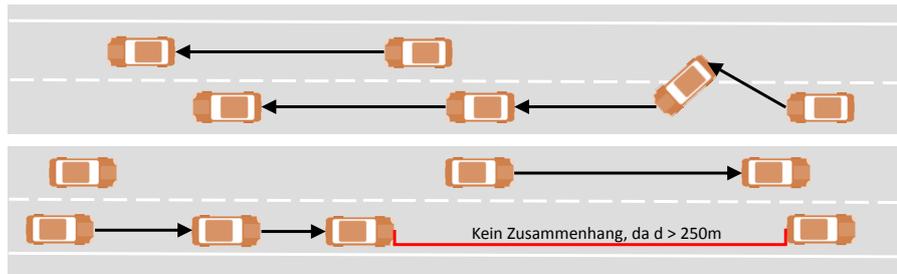


Bild 3.6 Schematische Darstellung einer Zusammenhangsliste durch Verkettung nachfolgender Fahrzeuge. Eigene Darstellung.

3.3.1.5 Umgebungstabelle (Surroundings)

Bei der Modellierung fahrzeugbasierter Intelligenter Verkehrssysteme ist es von Bedeutung, dass für einzelne virtuelle Fahrzeuge genügend Informationen über das Fahrzeugumfeld, insbesondere andere Fahrzeuge in der näheren Umgebung vorliegen. In der Realität geschieht dies etwa bei kooperativen Systemen, indem Fahrzeuge ihre aktuelle Fahrzeugposition per V2X-Nachricht versenden und damit alle Fahrzeuge im Empfangsbereich der Nachricht über dessen Existenz informiert sind. Schematisch ist der Sachverhalt in Bild 3.7 illustriert. Das rot markierte ist das momentan betrachtete Fahrzeug (es wird auch *Ego* bezeichnet). Es ist außerdem mit *E* gekennzeichnet. Alle anderen Fahrzeuge, die in Kommunikationsreichweite des Ego sind und ihre Position gemeldet haben, werden in die Umgebungstabelle aufgenommen. Sie sind im Bild orange markiert und mit *U* gekennzeichnet.

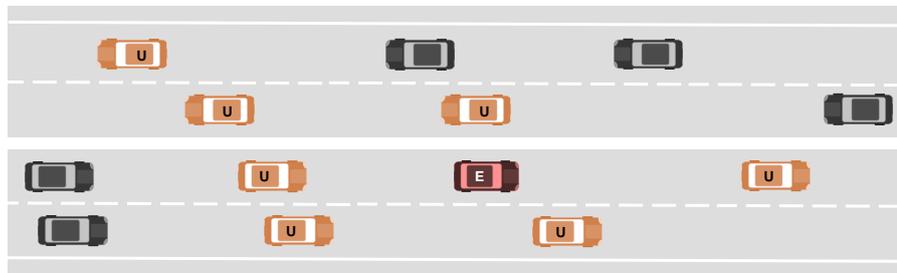


Bild 3.7 Schematische Darstellung aller Fahrzeuge in der Umgebungstabelle (U) für ein ausgewähltes Fahrzeug (E). Eigene Darstellung.

Auch ohne Berücksichtigung der V2X-Kommunikation kann die Fahrzeugumgebung von Interesse sein. Beispielsweise können aktuelle Oberklassefahrzeuge mit verschiedenartigen Sensoren alle Fahrzeuge im direkten Umfeld detektieren und haben somit einen „Rundumblick“, der ebenfalls in einer Umgebungstabelle erfasst werden kann. Die Umgebungstabelle ist von der jeweiligen Applikation zu füllen, etwa durch Auflistung aller senderer Fahrzeuge, deren virtuelle Nachricht auf Basis des Wahrscheinlichkeitsmodells, das in Abschnitt 2.5.3 beschrieben ist, vom *Ego*-Fahrzeug empfangen wurde.

3.3.1.6 Positionsketten (*Trace*)

Um fahrzeugbasierte Systemfunktionen unabhängig von der zugrunde liegenden Streckennetzrepräsentation gestalten zu können, ist die Konzeption einer zeitlich-räumlichen Aufzeichnung von Fahrzeugtrajektorien sinnvoll.

Das Konzept der Positionsketten (englisch: *Trace*) besteht darin, dass jedem Fahrzeug, für das es eingesetzt wird, eine Liste von Positionspunkten zugeordnet wird. Diese Positionspunkte bestehen aus geographischen Koordinaten, die genau den Punkten entsprechen, die das Fahrzeug in einer bestimmten Zeit oder auf einer bestimmten Strecke zurückgelegt hat. Die Länge der Kette, die Dauer der Aufzeichnung sowie der Abstand und die maximale Anzahl aufgezeichneter Positionen können konfiguriert werden. Dieses Konzept wurde im Forschungsprojekt sim^{TD} (siehe Abschnitt 2.6.6) u. a. zur Relevanzprüfung von V2X-Nachrichten verwendet. Die Nutzung der Positionsketten in sim^{TD} ist in [SIMTD KONSORTIUM 2009] näher beschrieben. Anhand einer solchen Positionskette kann auch der Streckenverlauf nachvollzogen werden. Dies ist beispielsweise zur Vorhersage von potentiell schwer einsehbaren Kurven hilfreich. Außerdem ist entlang einer Positionskette mithilfe der Zwischenpunkte eine genauere Abstandsberechnung zwischen zwei Punkten als die in Verkehrssimulationen übliche Luftlinienberechnung möglich.

Das Softwareframework bietet dazu die Klasse *Trace* an, die alle Funktionalitäten für die effiziente Generierung von Positionspunkten, das Aufspannen von rechteckigen oder kreisförmigen Relevanzbereichen entlang der Positionskette sowie das *Trace-Matching* anbietet. Bild 3.8 illustriert das Prinzip der Positionsketten anhand der sternförmigen Positionspunkte entlang einer befahrenen Strecke.

Trace-Matching: Zur Prüfung der Relevanz einer Nachricht an ein Fahrzeug, das sich innerhalb dieses Bereichs befindet, findet zusätzlich ein *Trace-Matching* statt, bei dem der geometrische Abstand des nachfolgenden Fahrzeugs zur empfangenen Positionskette sowie die Fahrtrichtung entsprechend der Positionskette ausgewertet wird. Mittels *Trace-Matching* kann für ein nachfolgendes Fahrzeug sehr genau ermittelt werden, ob es dieselbe Strecke befährt wie das Fahrzeug, das eine mögliche Warnung für die nachfolgende Strecke aussendet.

Referenzposition: Als Referenzposition wird, angelehnt an die Definition aus dem Projekt sim^{TD} (siehe [SIMTD KONSORTIUM 2009]), die geographische Position im Netzmodell bezeichnet, die ein auslösendes Objekt als relevante Position für ein zugehöriges Ereignis identifiziert. Diese Referenzposition dient nachfolgenden Fahrzeugen zur Bestimmung deren Abstandes zum Ereignis sowie zur Definition eines Relevanzgebietes, das um diese

Referenzposition aufgespannt wird. Bei einem Ereignis, dem eine solche Referenzposition zugeordnet wird, kann es sich um eine statische Position, z. B. eine Warnbake am Beginn einer Baustelle oder einen Anzeigequerschnitt für eine infrastrukturseitige Umleitungsempfehlung handeln. Die Position kann jedoch auch dynamisch, also über die Simulationszeit veränderlich sein, was beispielsweise bei einem Stauende der Fall ist, das sich stromaufwärts bewegt und vor dem periodisch durch Fahrzeuge, die die Einfahrt in den Stau erkennen, per V2X-Nachricht gemeldet wird.

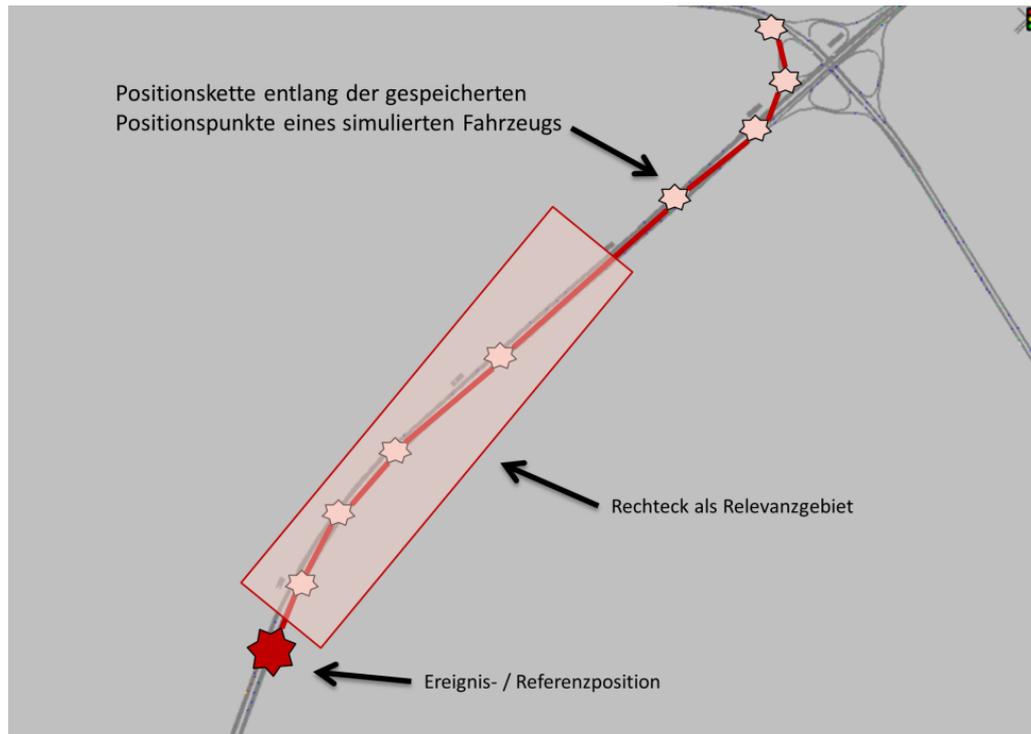


Bild 3.8 Schematische Darstellung einer Positionskette und eines rechteckigen Relevanzbereiches einer Fahrerinformation, die sich auf ein Ereignis an der Referenzposition bezieht, entlang eines Simulationsnetzes. Eigene Darstellung basierend auf einer Netzansicht aus PTV Vision VISSIM.

3.3.1.7 Relevanzbereich (*RelevanceArea*)

Der Bereich, in dem ein Intelligentes Verkehrssystem einzelne Fahrzeuge beeinflussen soll, kann räumlich abgegrenzt werden, indem ein eindeutiges geographisches Gebiet definiert wird, außerhalb dessen seitens der Applikation keinerlei Beeinflussung stattfindet. In Bild 3.8 ist ein rechteckiger Relevanzbereich definiert, der hinter einem Ereignis (hier einem liegengebliebenen Fahrzeug, das eine Warnung aussendet), aufgespannt wird. Angelehnt an Überlegungen, die im Projekt WILLWARN (siehe [HILLER ET AL. 2007]) entstanden und im Projekt sim^{TD} für die Funktionen im Feldversuch in konkreter Implementierung umgesetzt wurden, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine angepasste geometrische Modellierung für

die Anbindung an die Simulation mit vtSim entwickelt. Es gibt dabei zwei geometrische Implementierungen für den Relevanzbereich:

- Die Klasse *Circle* für kreisförmige Relevanzgebiete um die Referenzposition.
- Die Klasse *Rectangle* für rechteckige Relevanzgebiete ausgehend von der Referenzposition entlang der Positionskette.

3.3.1.8 Ereignisaggregat (*WarningGenerator*)

V2X-Applikationen werden dazu genutzt, Informationen von Fahrzeugen oder der Verkehrsinfrastruktur in dafür vorgesehenen Nachrichten an andere Fahrzeuge bzw. zurück zur Verkehrsinfrastruktur zu senden, sobald die modellierte Applikation einen solchen Versand auslöst. Dies kann zeit- (etwa kontinuierlich eine Nachricht pro Sekunde) oder ereignisbasiert (beispielsweise wenn eine gefährliche Situation wie ein Stauende erkannt wird) passieren. Nach dem Empfang der Nachrichten seitens der Fahrzeuge und / oder der Infrastruktur innerhalb der Empfangsreichweite werden die enthaltenen Informationen in der Regel so aufbereitet, dass sie als Ereignisse interpretiert werden können. Ereignisse können beispielsweise ein Hindernis auf der Fahrbahn, eine charakteristische Verkehrslage oder eine Umleitungsempfehlung zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort sein. Als Ereignisaggregat wird eine Systemkomponente bezeichnet, die in einem Fahrzeug oder einer Infrastruktureinrichtung all diese aufbereiteten Ereignisse sammelt und eine jeweils geeignete Weiterverarbeitung anstoßen kann.

3.3.1.9 Zustandsbasierte Fahrzeugbeeinflussung (*DrivingController*)

Die beeinflussenden Parameter des Fahrer-Fahrzeug-Verhaltens werden durch die grundlegenden Algorithmen der jeweiligen Applikation bestimmt. Eine Rahmenkomponente dafür stellt die Klasse *StateBasedDrivingController* dar. Ein Funktionsablauf basierend auf den in Abschnitt 3.6.5 beschriebenen Zustandsautomaten kann damit innerhalb einer vordefinierten Struktur implementiert werden.

3.3.1.10 Modellkomponente für die V2X-Nachrichtenübertragung (*MessageHandler*)

In einer für kommunikationsbasierte Verkehrssysteme relevanten Softwarekomponente kann die V2X-Nachrichtenübertragung an die Applikation angebunden und konfiguriert werden. Hierbei kann zwischen zwei Varianten gewählt werden:

VCOM: Eine effiziente und realitätsnahe Abbildung ermöglicht das Modell VCOM, das vom Karlsruher Institut für Technologie entwickelt wurde und in Abschnitt 2.5.3 beschrieben ist.

Frei konfigurierbare Empfangswahrscheinlichkeit: vtSim bietet darüberhinaus eine simulatorunabhängige und frei konfigurierbare Referenzimplementierung des VCOM-Modells an. Diese kann in V2X-Applikationsmodellen für Simulationen genutzt werden. Der Einfluss verschiedener Reichweiten kann dadurch gezielt und einfach ermittelt werden.

Bild 3.9 zeigt vier mögliche Funktionen, die die Wahrscheinlichkeit des Nachrichtempfangs möglicher Empfänger in Abhängigkeit zum Sender der jeweiligen Nachricht beispielhaft illustriert.

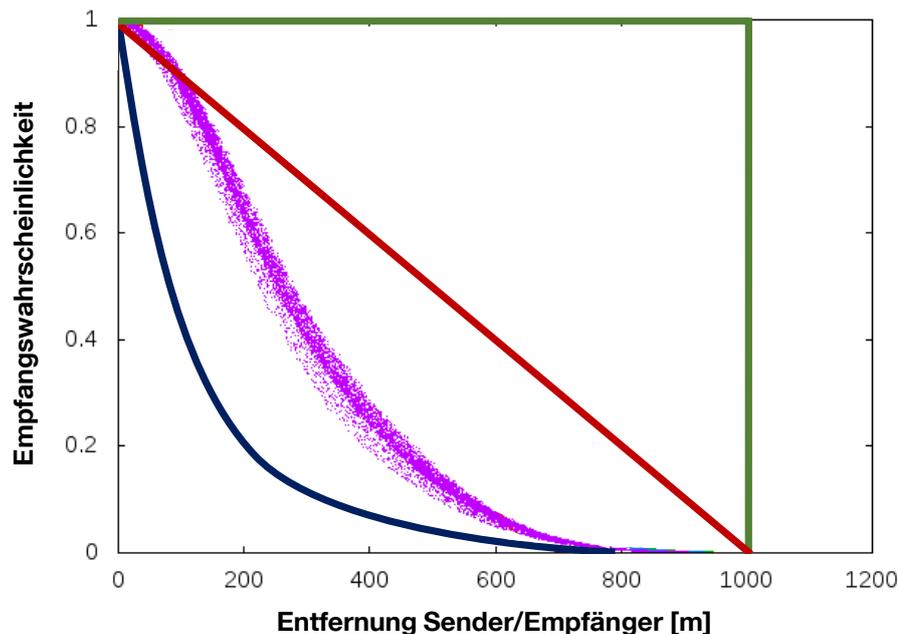


Bild 3.9 Darstellung verschiedener Funktionen zur Illustration der Konfigurationsmöglichkeiten für die Sensitivitätsanalysen der Qualität der V2X-Nachrichtenübertragung. Abwandlung der Darstellung aus [GAUGEL ET AL. 2011].

Diese vier Funktionen sind:

- Wahrscheinlichkeitsfunktion entsprechend der Parameter aus dem VCOM-Modell gemäß Abschnitt 2.5.3 (lila Kurve).
- Hypothetische ideale Kommunikation innerhalb eines definierten Bereichs: Alle potentiellen Empfänger, die eine definierte Entfernung zum Sender (im Bild 1000 m) nicht überschreiten, erhalten die Nachricht sicher (grüne Kurve).
- Linearer Abfall der Empfangswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Entfernung zum Sender bis zur Wahrscheinlichkeit 0 (im Bild bei 1000 m, rote Kurve).
- Beliebige frei definierte Wahrscheinlichkeitsfunktion. Die blaue Kurve im Bild repräsentiert die beispielhafte Wahrscheinlichkeitsfunktion $P(d) = 0,992^d$ mit d = Distanz zwischen Sender und Empfänger.

3.3.1.11 Koordinatentransformation (*MapMatching*)

Viele Intelligente Verkehrssysteme basieren auf der geographischen Verortung von Fahrzeugen und/oder straßeninfrastrukturseitiger Einrichtungen, wie z. B. Lichtsignalanlagen oder Schilderbrücken. Reale Fahrzeuge benutzen dazu satellitenbasierte Positionierungssysteme (englisch *Global Navigation Satellite System - GNSS*), wie z. B. das *Global Positioning System (GPS)*. Der GPS-Positionierung liegt das Koordinatensystem *WGS84* zugrunde (siehe [HAKE ET AL. 2002]). Für die Verkehrssimulation können ausschließlich planare kartographische Koordinatensysteme verwendet werden. In der Kartographie ist gemäß [HAKE ET AL. 2002] für planare Karten das Koordinatensystem *Gauß-Krüger* geläufig. Bei maßstabsgetreuer Abbildung des Netzmodelles in der Verkehrssimulation kann jedes Netz durch geeignete Skalierung und Verschiebung in das Gauß-Krüger-System überführt werden (Schematisch dargestellt in Bild 3.10). Dazu ist die Kenntnis der Verschiebungsparameter (englisch: *Offset*) notwendig. Diese kann durch einen Referenzpunkt, der jeweils in beiden Netzrepräsentationen identifiziert werden muss, ermittelt werden.

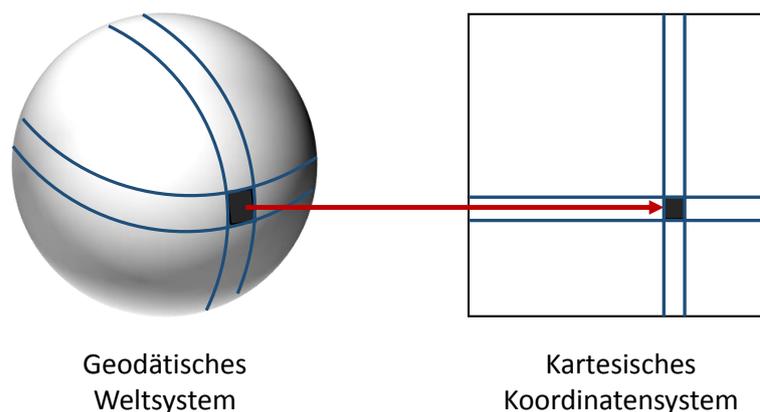


Bild 3.10 Darstellung der notwendigen Koordinatentransformation von einem geodätischen Weltsystem in ein planares kartesisches Koordinatensystem für einzelnen Anwendungen. Eigene Darstellung.

Das hier beschriebene Softwareframework enthält zur Ausführung solcher Koordinatentransformationen die Komponente *MapMatching*, die genutzt werden kann, um alle Positionsberechnungen unabhängig von zugrunde liegenden Koordinatensystemen durchführen zu können. Zur Umsetzung der Funktionalität wurden Transformationsalgorithmen aus dem kartografischen Projektionsprojekt PROJ (siehe [EVENDEN 1990]) verwendet. Es wurde im Projekt METACRS [2009] in die Sprache Java portiert.

3.3.2 Applikationskonfiguration

In einer vtSim-Konfigurationsdatei der Applikation können verschiedene Parameter zur System- und Modellkonfiguration eingestellt werden, die zugrunde liegende Modellkomponenten und Stellgrößen des Systems für die Simulation definieren.

3.3.2.1 Angabe der zu verwendenden Komponenten

In der Konfigurationsdatei kann zunächst mittels des Parameters *SIMULATOR_CLASS* definiert werden, mit welcher Verkehrssimulationsanwendung die spätere Simulation des Modells durchgeführt werden soll. Dadurch wird die Applikationsschnittstelle automatisch per Delegation an den entsprechenden Simulationsadapter (siehe Abschnitt 3.3.3) angebunden. Der Simulations-Delegator (siehe Abschnitt 3.3.1.1) nutzt dann genau diese simulatorspezifische Adapterklasse, die wiederum die Schnittstellen der zugehörigen Verkehrssimulation aufruft. Am Beispiel von VISSIM ist der Parameter mit dem VISSIM-Adapter *VissimC2XApplication* belegt.

Analog dazu stellt der Parameter *MESSAGE_HANDLER*, entsprechend Abschnitt 3.3.1.10, die zu nutzende Funktionalität für die Abbildung der V2X-Nachrichtenübertragung ein. Dieser Parameter kann auch mit dem Wert *None* belegt werden. Dann nutzt die Applikation gegebenenfalls implizite Funktionalitäten der zugrunde liegenden Simulationsanwendung zur Nachrichtenübertragung, wenn diese durch den Adapter angebunden werden. Die Einstellung *None* ist auch dann sinnvoll, wenn die Applikation keine V2X-Nachrichtenübertragung nutzt. Schließlich kann anhand des Parameter *DRIVING_CLASS* definiert werden, welche Klasse für die Beeinflussung des Fahrverhaltens in der Simulation verwendet werden soll. Der Code-Auszug 3.1 zeigt ein Beispiel für eine Belegung der Komponentenkonfiguration.

Listing 3.1 Beispiel für die Einstellung der zu nutzenden Modellkomponenten in der Konfigurationsdatei.

```
SIMULATOR_CLASS=vtsim . application . VissimC2XApplication  
MESSAGE_HANDLER=vtsim . comm . VCOMMessageHandler  
DRIVING_CLASS=vtsim . application . CACCStateBasedDrivingController
```

3.3.2.2 Konfigurator für Parametervariation

Die Variation verschiedener allgemeiner oder spezifischer Parameter eines zu modellierenden Systems führt zu unterschiedlichen Szenarienvarianten.

Allgemeine Parameter sind beispielsweise:

- Kommunikations-Reichweite für V2X-Anwendungen (beeinflusst die Größe der Umgebungstabelle).
- Senderate: Anzahl der pro Sekunde ausgesendeten V2X-Nachrichten.
- Warnstufen für Fahrerwarnungen auf dem virtuellen Display im simulierten Fahrzeug.

Spezifische Systemparameter sind Stellgrößen für den Funktionsalgorithmus einer speziellen Anwendung wie etwa den Regelkreis eines Fahrerassistenzsystems.

Allgemeine und spezifische Systemparameter sollten im Sinne eines flexiblen und modularen Entwurfskonzeptes in einer ausgelagerten Konfiguration parametrierbar sein. Hierzu gibt es die Konfigurationskomponente, die es erlaubt, eine Konfigurationsdatei mit beliebigen Schlüssel-Wert-Paaren anzulegen und für die jeweilige Anwendung zu nutzen. Eine Besonderheit stellt hierbei die integrierte Szenarienkonfiguration dar: Für jeden Systemparameter können beliebig viele verschiedene Werte angegeben und damit diskrete Verteilungen definiert werden. Dies ist relevant für die in Abschnitt 3.7.3 beschriebenen Sensitivitätsanalysen. In der Simulationsumgebung können dann viele Simulationsläufe hintereinander automatisch (oder auch manuell, wenn gewünscht) mit verschiedenen Parameterkonfigurationen gestartet werden, ohne dass zwischen den Läufen eine Neukonfiguration stattfinden muss. Dies übernimmt der vtSim-Konfigurator vollautomatisiert. Es ist lediglich darauf zu achten, dass die Zahl der Simulationsläufe genau der Anzahl der zuvor definierten Parameterkombinationen entspricht.

Ein Beispiel für eine solche Parameterkonfiguration ist im Code-Auszug 3.2 gegeben. Das Beispiel enthält fünf verschiedene Systemparameter, die mit einer Parameterstichprobe, bestehend aus jeweils fünf bis sechs Werten, belegt werden. Mittels automatisierter Ausführung der Parametersensitivitätsanalysen im Softwareframework werden alle Werte für jeden Parameter automatisch durchlaufen und anschließend in der Analysekomponente in entsprechenden statistischen Auswertungen hinsichtlich ihrer Verkehrswirkungen gegenübergestellt. Ein Ausrufezeichen an einem konkreten Wert der Parameterstichprobe bedeutet dabei, dass dies der Standardwert des Parameters ist, der festgehalten wird, während die Werte für einen anderen Parameter variiert werden. Dies ermöglicht die Reduktion der Analysekomplexität und führt zu einem Screeningverfahren gemäß Abschnitt 2.3.

Listing 3.2 Beispiel für die Definition der Stellgrößenverteilungen in der Konfigurationsdatei.

```
MIN_NR_OF_FOLLOWERS=[1 ,!2 ,3 ,4 ,5 ,6]  
HEADWAY_CACC=[0 ,5 ,!0.6 ,0.8 ,1.0 ,1.2]  
HEADWAY_NO_CACC=[!1.2 ,1.4 ,1.5 ,1.8 ,2.0]
```

```
MIN_CACC_SPEED_BOUND=[15.0,18.0,!19.44,20.0,22.0]
```

```
CACC_NOTIFICATION_RADIUS=[200.0,!250.0,300.0,400.0]
```

3.3.3 Adapter für konkrete Verkehrssimulationsanwendungen

Die spätere Simulation der modellierten Verkehrsanwendungen erfolgt mittels etablierter Simulationsanwendungen, die in Abschnitt 2.5.1 erwähnt sind. Um einen generischen Zugriff auf die Programmierschnittstellen der jeweiligen Simulationssoftware zu ermöglichen, müssen diese mit den vtSim-Anwendungsschnittstellen verbunden werden. Dazu benötigt vtSim für jede zu nutzende Simulationsanwendung jeweils eine Adapterklasse, die die entsprechenden Methoden und Variablen überträgt. In der Referenzstudie wird ein solcher Adapter für die Simulationssoftware PTV Vision VISSIM verwendet. Dieser wird im Folgenden näher erläutert:

VISSIM bietet neben anderen Programmierschnittstellen zur Anbindung externer Applikationen (z. B. verkehrsadaptiven Lichtsignalsteuerungen) auch eine Möglichkeit an, Skripte zur dynamischen Verarbeitung von V2X-Funktionalitäten zu implementieren. Mittels dieser *C2X-API* können Informationen zu Fahrzeugen und Infrastruktur zur Laufzeit gelesen und beeinflusst werden. Die *C2X-API* ist direkt verbunden mit einer dynamischen Bibliothek, die das *VCOM-Modell* (siehe Abschnitt 2.5.3) implementiert. Somit können Skripte direkt den Nachrichtenversand und den Abruf empfangender Fahrzeuge mittels *VCOM* nutzen. Derartige Skripte können grundsätzlich in den Programmiersprachen C++ (native Anbindung) oder Python implementiert werden. Die PTV AG empfiehlt die Nutzung der Python-Variante. Sie ist daher auch in der Standardversion mittels der C-Bibliothek *boost* angebunden und ohne weitere Konfiguration verwendbar.

Im Rahmen der vtSim-Entwicklung wurde die native C++ - Schnittstelle mithilfe der Bibliotheken des Java Native Interfaces (JNI) zur Verwendung in Java-Projekten nutzbar gemacht. Dazu wurden die C++ - Headerklassen zu einer dynamischen Bibliothek mit dem Namen *C2X_VISSIM.dll* mit der für vtSim relevanten Paketstruktur kompiliert, die wiederum direkt mittels JNI in Java-Klassen angesprochen werden konnte. So konnte auf der Java-Seite der VISSIM-Adapter entstehen, der die entsprechenden Methoden aus der *C2X-API* aufruft und im vtSim-Framework nutzbar macht. Die Applikationskomponenten delegieren ihre Aufrufe an diesen Adapter, so dass alle Funktionalitäten, die die *C2X-API* bietet, auch von diesen in vollem Umfang genutzt werden können. Die Delegation der Aufrufe an den VISSIM-Adapter können vollständig umgeleitet werden an einen anderen Adapter, z. B. an eine andere Simulationsumgebung wie SUMO oder AIMSUN. Es besteht außerhalb des Adapters kein Bezug zu einer VISSIM-Schnittstelle. Die Adapter der jeweiligen Simulatoren sorgen also dafür, dass die Anbindung auf der vtSim-Seite völlig unabhängig

und generisch ist. Sie können beliebig für jede Simulationsanwendung implementiert werden, müssen dabei jedoch die vtSim-Adapterschnittstelle vollständig implementieren, um den Anforderungen der Applikations-Delegatoren zu entsprechen.

Die Zusammenhänge sind schematisch in Bild 3.11 dargestellt.

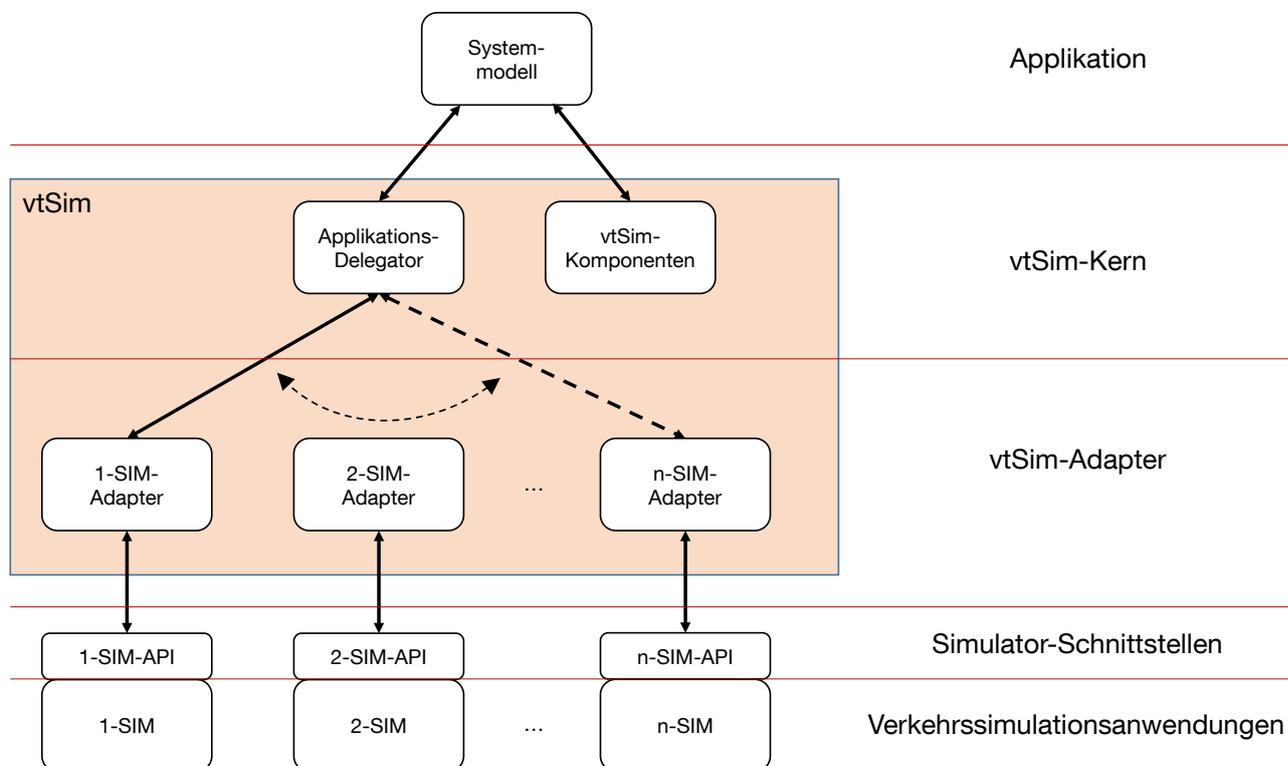


Bild 3.11 Struktur der generischen Anbindung von Systemmodellen an konkrete Simulationsanwendungen mittels Delegation der Aufrufe an entsprechende Schnittstellenadapter.

3.4 Kurzanleitung zur Nutzung des Softwareframeworks

Um den technischen Applikationsmodellierungsrahmen verwenden zu können, muss zunächst das Simulationsframework vtSim (siehe Abschnitt 3.2), in das es eingebettet ist, installiert und kompiliert werden. vtSim wird momentan erweitert und ausführlich dokumentiert. Die jeweils aktuellste Version einer detaillierten Bedienungsanleitung des gesamten Frameworks kann bei Bedarf angefragt werden.

Das Paket `de.tum.bv.vt.vtsim.application` enthält die abstrakte Klasse `V2XApplicationDelegate`. Jede Anwendung, die ein in der Verkehrssimulation zu untersuchendes Systemmodell implementiert, muss diese abstrakte Klasse erweitern. Insbesondere ist die Methode `processStep` zu überschreiben, in der entsprechend Abschnitt 3.3.1.2 der gesamte funktionale Ablauf des Systemmodells während eines Simulationszeitschrittes koordiniert und mit der Verkehrssimulation synchronisiert wird. Alle weiteren in 3.3.1 beschriebenen Softwarekomponenten

sind ebenfalls im Paket *de.tum.bv.vt.vtsim.application* zu finden und können direkt genutzt werden.

Darüber hinaus muss immer eine Hauptklasse existieren, die die Startmethode *main* enthält. Die Startmethode muss die Methode *run* des Applikations-Prozessors aufrufen. Diese Hauptklasse wird entweder (wie etwa im Fall von VISSIM) direkt von der Simulationsanwendung aufgerufen oder manuell gestartet. Für VISSIM muss dazu im Verzeichnis der Simulationsanwendung neben der VISSIM-Netzdatei auch eine Konfigurationsdatei *c2x.ini* liegen, die einen Java-Aufruf unter Berücksichtigung des gesamten relevanten Klassenpfades enthält. Für andere Simulationsanwendungen existieren vergleichbare Schnittstellenkonfigurationen. Als Beispiel, anhand dessen die Struktur und wesentliche Inhalte der Implementierung im Detail nachvollzogen werden können, wird mit vtSim die Beispielanwendung *ReferenceApplication* in Form eines Plugins mitgeliefert.

Anschließend ist die dateibasierte Konfiguration der vtSim-Applikation vorzunehmen. Das Vorgehen dabei ist Abschnitt 3.3.2 zu entnehmen. Die Konfigurationsdatei muss den Dateinamen *vtSim.conf* tragen und im Verzeichnis *config* direkt unterhalb des Hauptverzeichnisses der jeweiligen Applikation abgelegt sein.

3.5 Komponenten zur Datenanalyse und Szenarienspezifikation

Zusätzlich zum vorangehend beschriebenen Softwareframework für die Software-Modellierung von Systemmodellen Intelligenter Verkehrssysteme wurden zwei weitere Komponenten entwickelt, die eine modulare und valide Umsetzung üblicher Szenarien sowie eine effiziente und abgesicherte statistische Analyse der gewonnenen Simulationsergebnisse ermöglichen: Ein *Referenzstreckennetz* und das *Statistikmodul*. Diese beiden Komponenten sind nachfolgend näher erläutert:

3.5.1 Referenzstreckennetz

Verkehrssimulationen bilden Verkehrswege ab, die in der Regel auf Netzmodellen realer Straßen, Fußwege oder Radwege basieren. Die modellierten Streckennetze bilden die Grundlage für Simulationen in einer mit der Realität unmittelbar vergleichbaren und validierbaren Umgebung. Das jeweils konkret zu verwendende Streckennetz hängt von der Eignung für die Fragestellung und gegebenenfalls von der vom Auftraggeber der Simulationsstudie gewünschten Umgebung ab. Insbesondere sind bei der Auswahl einige Randbedingungen zu berücksichtigen, die die späteren Simulationsergebnisse entscheidend beeinflussen können. Ein Aspekt, der im Folgenden näher betrachtet wird, ist dabei der Einfluss der Streckengeometrie auf Kenngrößen bei der Wirkungsanalyse im Verkehr.

3.5.1.1 Komplexitätsbetrachtung von Netzmodellen

Bei der Durchführung von Sensitivitätsanalysen geht es ausschließlich um den Einfluss einer Systembeeinflussung und die dabei relevanten Parameter (Systemparameter oder Umgebungsvariablen) auf die Verkehrswirkung. Dieser Einfluss kann am besten gemessen werden, wenn die Struktur und die zu erwartenden Effekte weitgehend homogen über den Streckenverlauf sind.

Dieser Sachverhalt kann anhand der folgenden Überlegungen nachvollzogen werden:

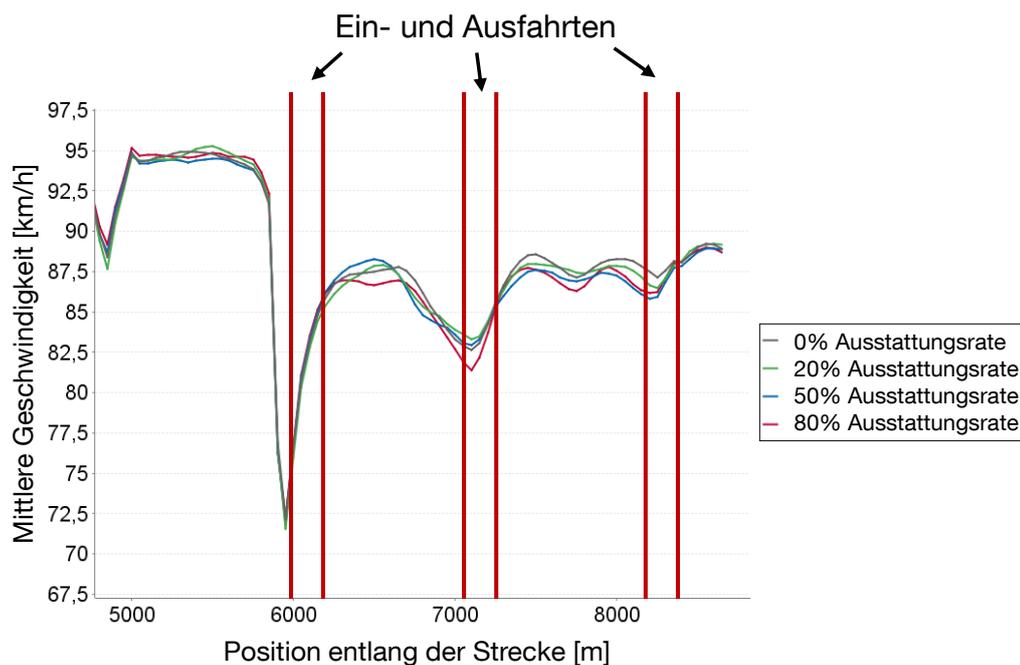


Bild 3.12 Verlauf der mittleren Geschwindigkeit entlang eines Streckenabschnitts in vier Szenarien mit verschiedenen Ausstattungsrate der V2X-Applikation Elektronisches Bremslicht

Bild 3.12 zeigt den Verlauf der mittleren Geschwindigkeit entlang eines Streckenabschnitts der Autobahn A5 als Ergebnis einer Analyse im Projekt sim^{TD} . Im analysierten Szenario wurde der Anteil von Fahrzeugen, die mit einem V2X-basierten elektronischen Notbremssystem ausgestattet waren, variiert. Die Funktionsweise des Notbremssystems sieht vor, dass auf dem Display für den Fahrer eines damit ausgestatteten Fahrzeugs eine Warnung angezeigt wird, wenn ein vorausfahrendes Fahrzeug eine starke Bremsung ($a < 0,4 \cdot g = 4,57 \frac{m}{s^2}$) durchführt und mittels V2X-Kommunikation entsprechende Nachrichten an umliegende Fahrzeuge aussendet. Ziel der Analysen war es, Effekte der Nutzung dieser Funktionalität auf den Verkehr zu ermitteln. Die Kenngröße hierfür ist die mittlere lokale Geschwindigkeit aller Fahrzeuge an Querschnitten im Abstand von 10 m entlang der Strecke. In der Grafik sind starke Schwankungen der Durchschnittsgeschwindigkeit zu erkennen. Ebenfalls ersichtlich ist jedoch, dass diese Schwankungen hauptsächlich im Bereich von Autobahnein- und ausfahrten auftreten. Dies lässt darauf schließen, dass der dichte Verkehr,

der in diesen Szenarien bestand, durch ein- und ausfädelnde Fahrzeuge gebremst wurde und es, insbesondere vor der ersten Ausfahrt, sogar zu Rückstausituationen kam. Diese Einflüsse auf die Geschwindigkeit sind wesentlich größer als die Effekte der Bremsfunktion, also die effektiven Unterschiede zwischen den vier Szenarienkurven in der Grafik. Dieser Umstand lässt erkennen, dass tatsächlich zu messende Effekte in einem Streckennetz mit komplexen verkehrsbeeinflussenden Infrastrukturelementen schwach ausgeprägt sind im Vergleich zu Störeffekten durch die Infrastruktur.

Die Auswahl eines Referenznetzes wird im Wesentlichen durch die zu untersuchende Maßnahme oder Funktionalität bestimmt. Generell kann hierbei zwischen zwei Situationen unterschieden werden:

1. **Beeinflussung und Wirkungsanalyse der Längsdynamik:** Hier ist eine Strecke notwendig, die möglichst wenig Störeinflüsse seitens der Straßeninfrastruktur aufweist um die Längsdynamik und die entsprechende Beeinflussung erfassen zu können.
2. **Beeinflussung und Wirkungsanalyse der Routenwahl:** Eine Analyse hinsichtlich der Wirkung einer Routenänderung einzelner Fahrzeuge auf den Gesamtverkehr betrifft die Verkehrsumlegung. Dazu muss das Untersuchungsnetz unterschiedliche mögliche Routen von einem oder mehreren Startpunkten zu einem oder mehreren Endpunkten anbieten. Dies ist nur einem verzweigten Netz mit parallelen Strecken möglich.

3.5.1.2 Ausgewählte Referenzstrecke

Für Untersuchungen, die den ersten Fall (Längsdynamik) abdecken, wurde ein Referenznetz versorgt. Ausgewählt wurde ein 3,6 km langer Ausschnitt der Autobahn A661 östlich von Frankfurt am Main. In Bild 3.13 ist der Streckenabschnitt in einer Kartenansicht von OpenStreetMap (www.openstreetmap.org) dargestellt.

Bild 3.14 zeigt das entsprechend daraus entstandene Streckenmodell in der Ansicht von PTV VISSIM.

3.5.1.3 Kalibrierung und Validierung des Verkehrsflusses auf der Referenzstrecke

Der Referenzstreckenabschnitt wurde mit Messungen aus der Realität kalibriert und ermöglicht die Simulation in realitätsnahen Szenarien im dichten Verkehr. Bild 3.14 zeigt zum einen den Messquerschnitt, an denen der Verkehr in das Netz einfließt. Er ist bezeichnet mit

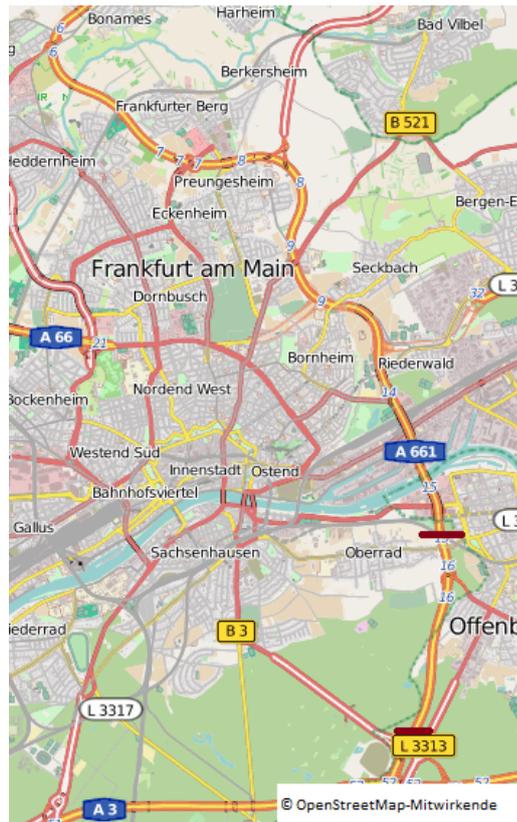


Bild 3.13 Referenzstreckenausschnitt (durch rote vertikale Balken rechts unten markiert) als Kartenausschnitt in der OpenStreetMap-Ansicht.

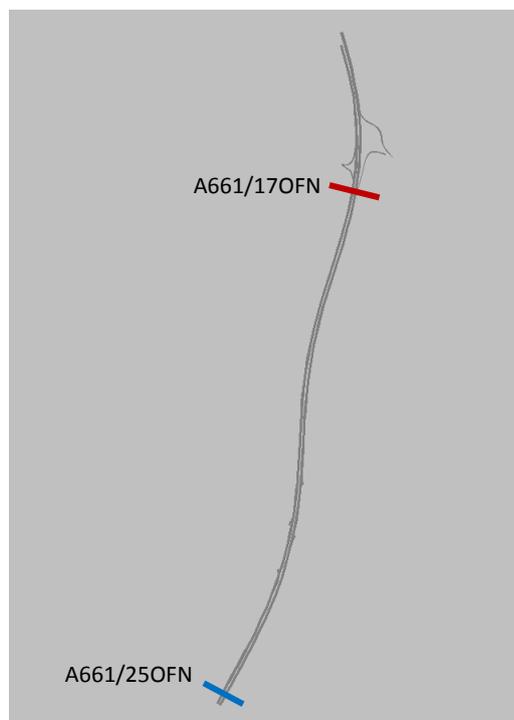


Bild 3.14 Referenzstreckenausschnitt mit Zufluss- (blau) und Validierungsquerschnitt (rot) als Netzdarstellung in PTV Vision VISSIM 5.40.

A661/25OFN. Zum anderen ist der Validierungsquerschnitt A661/17OFN eingetragen, an dem der simulierte Verkehr mit realen Messungen zu Validierung verglichen wurde.

Zur Quantifizierung der Abweichungen werden gemäß [FGSV 2006] die folgenden beiden Größen verwendet:

- RMSE: Mittlerer Quadratischer Fehler (Root Mean Square Error) sowie
- RMSPE: Prozentualer RMSE (Root Mean Square Percentage Error).

Der Abgleich der realen Messdaten in Bild 3.15 mit den Simulationsergebnissen ergibt, dass der Wert für den RMSPE für den Querschnitt A661/17OFN bei einem sehr geringen Wert von 1,59 % liegt.

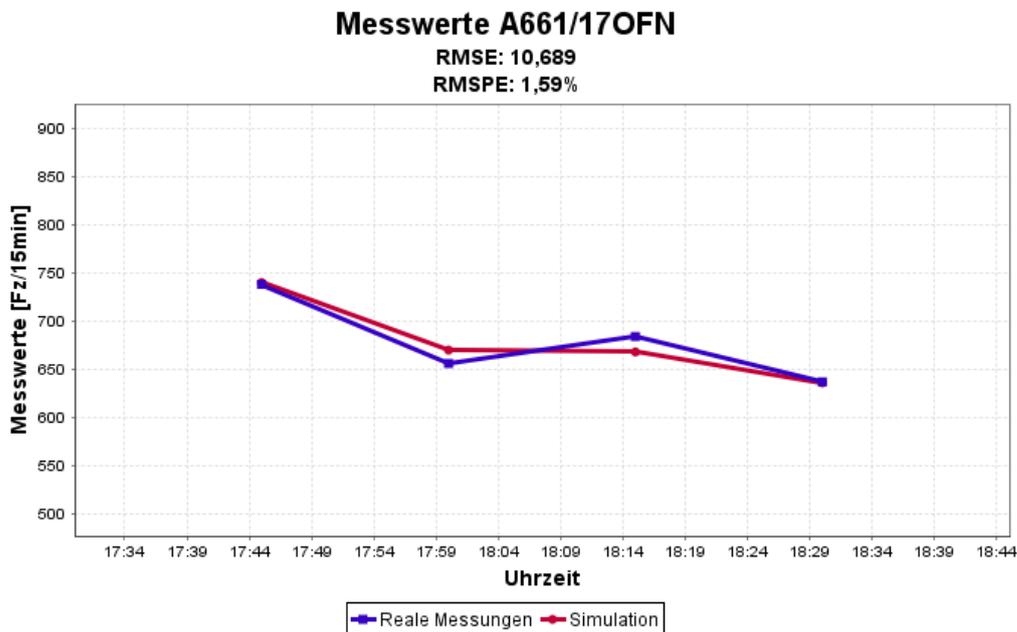


Bild 3.15 Validierung des Verkehrsflusses am Querschnitt A661/17OFN. Eigene Darstellung.

3.5.2 Statistikmodul

Die Sensitivitätsanalysen im Rahmen des Modellierungsprozesses sowie auch die späteren Analysen der Verkehrswirkungen des entwickelten Systemmodells sollen mit Hilfe statistischer Methoden abgesichert werden. Zu diesem Zweck wurde im Zuge dieser Arbeit ein Statistikmodul entwickelt. Zur Anbindung umfassender statistischer Funktionalitäten wurde das Java R Interface (JRI, siehe [R DEVELOPMENT CORE TEAM 2013]) genutzt, das die vollständige Einbettung der Statistiksprache R (siehe Abschnitt 2.3.6) in das Framework ermöglicht. Die automatisierte Ausführung folgender Analysen stellt den Kern des Statistikmoduls dar:

- Einlesen verschiedener Protokolldateien, die von Simulationsanwendungen zur dynamischen Aufzeichnung von Fahrzeug- und Infrastrukturinformationen während der Simulation aufzeichnen.
- Berechnung der Anzahl der benötigten Simulationsläufe auf Basis eines gewünschten Konfidenzintervalls.
- Integrierte Varianzanalyse zur Ermittlung signifikanter Unterschiede zwischen den Mittelwerten und Varianzen verschiedener Alternativszenarien und Untersuchungsgruppen.
- Berechnung der Effektstärke zur Beurteilung von relevanten Effekten des Einsatzes Intelligenter Verkehrssysteme.

3.5.2.1 Statistische Ermittlung der notwendigen Simulationsstichprobe

Entsprechend [FGSV 2006] und [PARK UND WON 2006] ist für jede stochastische Modellstudie im Bereich der mikroskopischen Verkehrssimulation die Anzahl der benötigten Simulationsläufe zu bestimmen. Die Stochastizität der Modelle, die auf Verteilungen für zentrale Parameter beruhen, begründet den Zufallscharakter eines jeden Simulationslaufes. Werte aus diesen Verteilungen werden, basierend auf einer vordefinierten Zufallszahl (*Startzufallszahl*), mittels der Monte-Carlo-Methode zufällig bestimmt. Für unterschiedliche Startzufallszahlen fallen die Ergebnisse der Simulationsläufe unterschiedlich aus.

Die Anzahl der notwendigen Simulationsläufe richtet sich nach der Größe des Konfidenzintervalls, innerhalb dessen der Mittelwert der jeweiligen Kenngröße mit einer Wahrscheinlichkeit, die dem Konfidenzniveau entspricht, liegen soll. Für das Konfidenzniveau wird typischerweise ein Wert von 95% angenommen. Es kann jedoch beliebig parametrisiert werden. Die Standardabweichung S der relevanten Kenngröße über die initialen Simulationsläufe bestimmt die Breite des tatsächlich erreichbaren Konfidenzintervalls CI , das mit einer Anzahl n an Simulationsläufen eingegrenzt werden kann. Es berechnet sich gemäß [PARK UND WON 2006] folgendermaßen:

$$CI = 1 - 2 * t_{(1-\alpha/2),n-1} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (3.1)$$

Dabei ist $t_{(1-\alpha/2),n-1}$ der Wert aus der t-Verteilung zur Ermittlung des zweiseitigen Fehlers, der sich bei $n - 1$ Freiheitsgraden bei einem Konfidenzniveau von α ergibt.

Diese Berechnung wird vom Analysemodul automatisiert vorgenommen, wenn folgende Parameter mittels der zugehörigen Konfigurationsdatei geeignet konfiguriert werden:

- Anzahl n der initial durchgeführten Simulationsläufe.

- Standardabweichung S der relevanten Kenngrößenmittelwerte zwischen den initialen Simulationsläufen.
- angestrebtes Konfidenzintervall CI_{wunsch} , um zu ermitteln, ob die Anzahl der initialen Simulationsläufe dafür ausreichend ist.
- gewünschtes Konfidenzniveau α . Standardwert ist 0,95 (95 %). Im Rahmen von Simulationsanalysen mit großen Stichproben für die Messwertverteilungen sind häufig auch signifikante Ergebnisse für ein Konfidenzniveau von 99 % erreichbar.

3.5.2.2 Modul für die Varianzanalyse in Sensitivitätsanalysen und Alternativstudien

Um die Ergebnisse der Simulationen verschiedener Szenarien auf gültige Weise miteinander zu vergleichen sind statistische Tests unumgänglich. Je nach Fragestellung und Zusammensetzung der Ergebnisverteilungen sind hierbei verschiedene Verfahren notwendig. Die nachfolgend aufgeführten Tests sind u. a. in [HEDDERICH UND SACHS 2012] zu finden.

Für den Vergleich zweier Alternativen bietet sich Student's t-Test an. Beim Vergleich von mehr als zwei Alternativen ist eine Varianzanalyse notwendig. Übliche Tests werden hierbei in der Gruppe der ANOVA-Tests (*ANalysis Of VAriance*) zusammengefasst. Je nach Art der untersuchten Verteilungen sind dabei spezielle Tests auszuwählen. Da derartige Varianzanalysen nur ergeben, ob signifikante Unterschiede bestehen, werden zusätzlich Post-Hoc-Tests angewendet, die spezifisch ermitteln können, welche der verglichenen Paare sich in welchem Maß konkret unterscheiden. Geläufig ist hierfür Tukey's Post-Hoc-Test.

Eine Voraussetzung für die Anwendung von ANOVA-Tests ist, neben der Varianzhomogenität und der Unabhängigkeit der Verteilungen, die Normalverteilung der zugrunde liegenden Stichproben. Ob die untersuchten Daten einer Normalverteilung unterliegen, kann mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test untersucht werden.

Als Alternativen, für die diese Bedingungen nicht erfüllt sein müssen, stehen nicht-parameterische Tests zur Verfügung. Anstelle des t-Tests zum Vergleich zweier Verteilungen kommt für typische Fragestellung im betrachteten Umfeld insbesondere der Mann-Whitney-U-Test in Frage. Für mehr als zwei Alternativen bietet sich hier der Kruskal-Wallis-Test an, der feststellt, ob es beim Vergleich mehrerer Stichproben signifikante Unterschiede gibt. Die Ausprägung der Signifikanz zwischen jeweils zwei verglichenen Alternativen kann im Anschluss der Wilcoxon-Rangsummentest quantifizieren.

Für die Tests kann jeweils ein anzustrebendes Konfidenzniveau angegeben werden. Aufgrund der üblicherweise großen Stichproben, die sich aus Simulationsstudien im Verkehr ergeben, ist ein Konfidenzniveau von 99 % zu empfehlen, welches starke statistische Aussagen ermöglicht.

Das Statistikmodul integriert alle in Tabelle 3.3 aufgelisteten Tests mittels Einbindung der entsprechenden R-Implementierung.

Der konkrete Ablauf zur Prüfung auf den zu nutzenden Test, der innerhalb des Statistikmoduls bei jeder Analyse durchlaufen wird, ist in Bild 3.16 dargestellt.

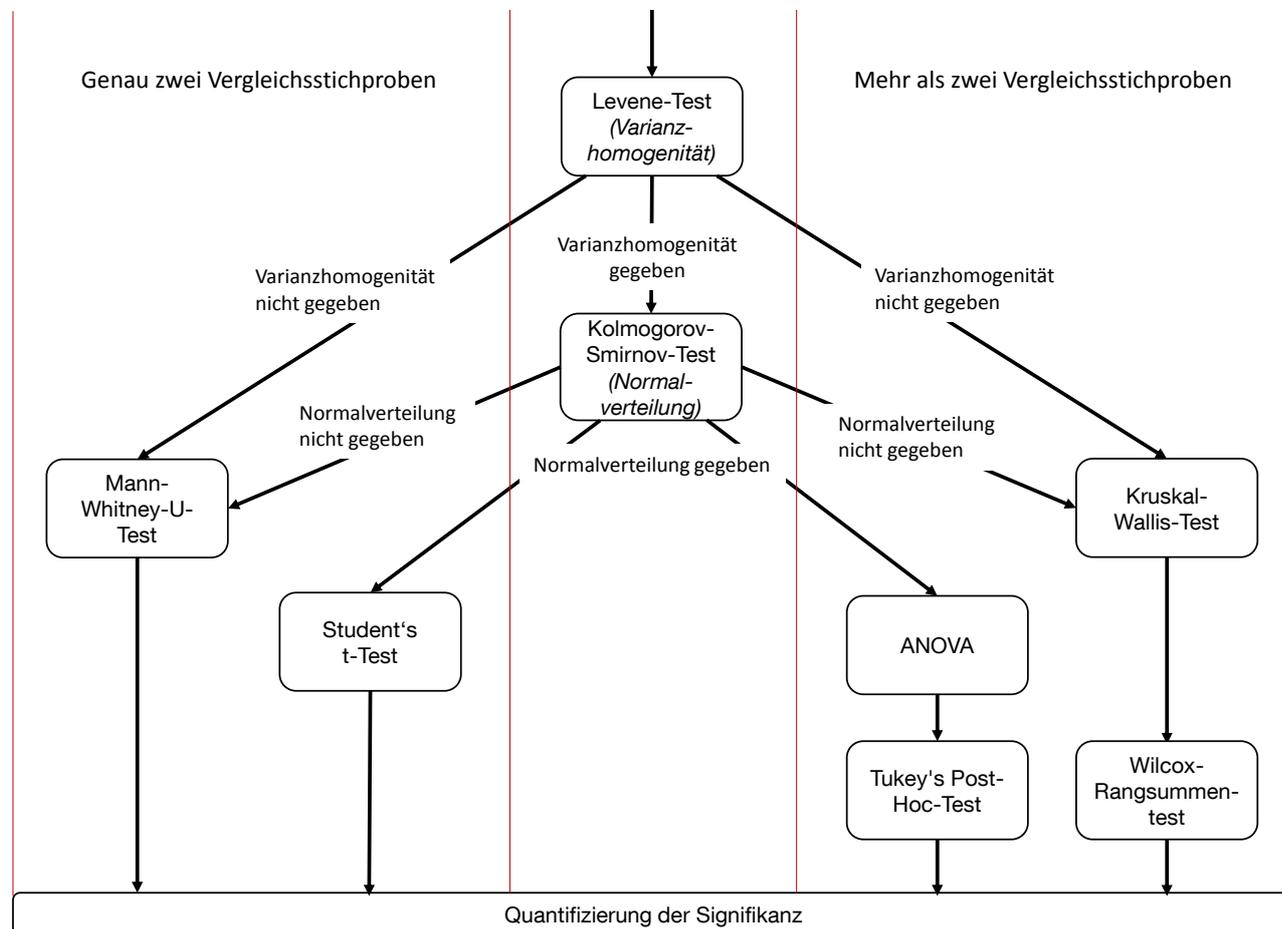


Bild 3.16 Darstellung des Ablaufs zur Auswahl der zu nutzenden statistischen Tests innerhalb des Statistikmoduls. Eigene Darstellung.

Mithilfe des Statistikmoduls werden Protokolldateien aus der Verkehrssimulation direkt eingelesen, Auswertungen und Tests automatisiert ausgeführt und Aussagen über statistische Kenngrößen in lesbarer Form aufbereitet generiert werden.

3.5.2.3 Berechnung der Effektstärke

Im Zusammenhang mit Signifikanzanalysen stellen BORTZ UND DÖRING [2006] fest, dass nicht allein die Signifikanz von Unterschieden zwischen zwei oder mehr Verteilungen relevant ist, sondern auch die *Effektstärke* dabei eine wichtige Rolle spielt. Die Effektstärke stellt eine Quantifizierung für das Ausmaß einer Wirkung dar. Insbesondere im Zusammenhang mit Simulationsergebnissen, die mehrere tausend Datensätze generieren, welche als Stichprobe genutzt werden können, werden auch geringe Unterschiede schnell signifikant. Dies führt zur Problematik der irrelevanten Signifikanzen, welche umgangen werden kann, wenn

Test	Voraussetzungen	Ziel des Tests	Anzahl vergli- chener Alter- nativen	Testergebnis
Student's Zweistichproben- t-Test	Normalverteilung, gleiche Stich- proben (robust gegen Abweichung)	Vergleich von Mittelwerten	genau zwei	p-Wert für Signifi- kanz (quantitativ)
ANOVA	Varianz- homogenität, Normalvertei- lung	Vergleich von Mittelwerten	mehr als zwei	Vorliegen eines si- gnifikanten Unter- schiedes (qualitativ)
Tukey's Post-Hoc-Test	Varianz- homogenität	Quantifizierung der Signifikan- z im Nachgang zu ANOVA	mehr als zwei	p-Wert für Signifi- kanz, wenn ANO- VA Signifikanz fest- stellt (quantitativ)
Mann-Whitney- U-Test	keine	Test auf Über- einstimmung der Verteilungen	genau zwei	p-Wert für Signifi- kanz (quantitativ)
Kruskal-Wallis- Test	keine	Test auf Über- einstimmung der Verteilungen	mehr als zwei	Vorliegen eines si- gnifikanten Unter- schiedes (qualitativ)
Paarweiser Wilcoxon- Rangsummentest	keine	Quantifizierung der Signifi- kanz zwischen jeweils zwei Alternativen	zwei mehr oder	p-Wert für Signifi- kanz (quantitativ)
Levene-Test	keine	Test auf Varianz- homogenität	mindestens eine	p-Wert als Maß für Wahrscheinlich- keit der Annahme
Kolmogorov- Smirnov-Test	keine	Test auf Vorlie- gen einer be- stimmten Vertei- lung (z. B. Nor- malverteilung)	genau eine	p-Wert als Maß für Wahrscheinlich- keit der Annahme

Tabelle 3.3 Statistische Tests, die im Statistikmodul integriert sind.

ein sinnvolles Maß für einen inhaltlich relevanten Unterschied zwischen zwei Verteilungen gefunden wird. COHEN [1988] schlägt hierfür einen Schätzwert vor, der als geläufige Abschätzung für die *Effektstärke* in Varianzanalysen verwendet wird. Der Schätzwert wird *Cohen's d* genannt und folgendermaßen berechnet:

$$d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{(s_1^2 + s_2^2)}{2}}} \quad (3.2)$$

\bar{x}_i stellt den jeweiligen Mittelwert und s_i^2 die Varianz aus den Verteilungen dar.

Cohen indiziert

- $d \geq 0,2$ als kleinen,
- $d \geq 0,5$ als mittleren,
- $d \geq 0,8$ als starken Effekt.

Die automatisierte Berechnung der Effektstärke aus Simulationsprotokollen ist in das Statistikmodul integriert.

3.6 Modellspezifikation

In diesem Abschnitt wird das konzeptionelle Vorgehen bei der Modellierung Intelligenter Verkehrssysteme auf Basis des Modellierungsrahmens im Detail beschrieben. Ausgangspunkt ist jeweils die vorliegende Art der Systembeschreibung. Die Modellspezifikation beginnt mit einer textuellen Beschreibung der Funktionalität. Hierbei werden bereits modelltheoretische Überlegungen einbezogen, die über eine rein funktionale Sichtweise hinausgehen.

3.6.1 Textuelle Beschreibung des Systems

Aus der textuellen Beschreibung sollen statische Komponenten und funktionale Abläufe eindeutig ableitbar sein, da sie als Grundlage für die darauffolgende Zustands- und Strukturbeschreibung dient. Diese sollen in einem Zustandsautomat und einem oder mehreren Komponentendiagrammen veranschaulicht werden, bevor eine darauf aufbauende Implementierung erfolgen kann. Eine textuelle Beschreibung des zu modellierenden Systems kann bei einem bestehenden System bereits von den Applikationsentwicklern im Hinblick auf die Referenz in der realen Umgebung erstellt worden sein. Bei einer neu zu spezifizierenden Funktionalität sind die Konzeptideen konkret zusammenzufassen.

Sinnvoll ist die vollständige Beschreibung von Wirksituationen, also eine räumlich-zeitliche und ereignisorientierte Eingrenzung der Orte, Zeiten und Randbedingungen, für die die Anwendung des zu untersuchenden Systems relevant ist.

An dieser Stelle findet zudem eine erste Abstraktion der vollständigen realen Applikation statt. Vor dem Hintergrund der Zielrichtung einer Wirkungsermittlung im Verkehr können dabei bereits Systemelemente weggelassen werden, die nur auf den Komfort des Nutzers bzw. Fahrers ausgelegt sind oder voraussichtlich nur sehr selten zum Einsatz kommen, so dass sie in der aggregierten Gesamtbetrachtung des Verkehrs nicht signifikant in Erscheinung treten.

3.6.1.1 Identifikation und Beschreibung von Wirksituationen

Nur wenn die angestrebte Wirkweise eines Intelligenten Verkehrssystems im Detail erfasst ist, kann sie in einer Modellumgebung sinnvoll umgesetzt werden. Aus diesem Grund ist eine exakte Definition der Situationen, in denen das Zielsystem wirken kann und soll, unumgänglich. Dies umfasst zum einen konkrete Orte, Ereignisse und Zeitpunkte, an denen das System installiert ist und/oder Systemauslösungen vorgesehen sind. Häufig sind dies *Auslösesituationen* wie beispielsweise

- ein Verkehrsstau,
- eine Arbeitsstelle (Baustelle),
- eine neue zulässige Höchstgeschwindigkeit,
- ein unerwartetes Verhalten des vorausfahrenden Fahrzeugs,
- ein dynamisches Verkehrszeichen,
- eine Warnung oder Information im Fahrzeug.

Eine Beeinflussung durch das auslösende System geschieht dann genau zu der Zeit und an dem Ort, an dem das betreffende Ereignis ausgelöst wird. Daraus folgt, dass eine Verkehrswirkung in der Umgebung derartiger Ereignisse zu erwarten ist.

3.6.2 Zu untersuchende Wirkungen auf den Verkehr

Eine erste wichtige Überlegung zur Spezifikation der Funktionalität des ist Systems das Verständnis für die Intention der untersuchten Anwendung. Dazu sind die angestrebten oder zu erwartenden Wirkungen zu identifizieren. Dies ermöglicht eine Abgrenzung der dafür benötigten Beeinflussungsaspekte bei der Modellierung. Dabei ist in zwei Schritten vorzugehen:

1. Identifikation der gewünschten Wirkdimension: Verkehrseffizienz oder Verkehrssicherheit. Wie in Abschnitt 2.6.3 erläutert, sind die Wirkungsziele Verkehrseffizienz oder Verkehrssicherheit prinzipiell gegenläufig. Somit zielen viele Applikationen auf positive Effekte in einer dieser beiden Wirkdimensionen ab. Es gibt allerdings auch Ansätze, insbesondere im Bereich der aktiven Fahrzeugsteuerung, die beide Wirkrichtungen adressieren (können).
2. Auswahl von Kenngrößen zur Wirkdimension in Abhängigkeit der Fragestellung. Eine konkrete Hilfestellung sollen dabei Tabelle 3.4 (Verkehrseffizienz) und Tabelle 3.5 (Verkehrssicherheit) geben.

Wirkdimension Verkehrseffizienz				
Kenngröße	Parameter	Einheit	Wertebereich	Interpretation
Zeitlücke	Mittelwert	[s]	[0,20]	Zusammenhang mit Kapazität
	Standardabweichung	[s]	[0,20]	
Fahrzeuggeschwindigkeit	Mittelwert	[km/h]	[0,250]	Je höher desto effizienter
	Standardabweichung	[km/h]	[0,200]	
Reisezeit	Mittelwert	[s]	N	Je niedriger desto effizienter
	Standardabweichung	[s]	N	

Tabelle 3.4 Vorgeschlagene Kenngrößen zur Wirkungsermittlung - Verkehrseffizienz

Wirkdimension Verkehrssicherheit				
Kenngröße	Parameter	Einheit	Wertebereich	Interpretation
Anteil kritischer Situationen	Anteilswert	[%]	[0,100]	Je niedriger desto sicherer
Fahrzeuggeschwindigkeit	Mittelwert	[km/h]	[0,250]	Je niedriger desto sicherer
	Standardabweichung	[km/h]	[0,200]	

Tabelle 3.5 Vorgeschlagene Kenngrößen zur Wirkungsermittlung - Verkehrssicherheit

Im Zusammenhang dieser Arbeit werden nur die in Tabelle 3.4 (Verkehrseffizienz) und Tabelle 3.5 (Verkehrssicherheit) genannten Kenngrößen zur exemplarischen Wirkungsermittlung herangezogen, da diese eine aussagekräftige Beschreibung von Wirkungen auf den Verkehr ermöglichen. Für weiterführende Wirkungsanalysen, die nicht Bestandteil

dieser Arbeit sind, jedoch unter Einbindung der mit dem vorgeschlagenen Framework implementierten Systemmodelle durchgeführt werden, ist ein erweitertes Analysekonzept mit weiteren Kenngrößen zu erwägen.

3.6.3 Funktional-technische Modellspezifikation

Ausgehend von der angestrebten Wirkung und den bereits vorgesehenen Komponenten ergeben sich konkrete technische Anforderungen an das System, die die Struktur und den funktionalen Ablauf des Systems vorgeben. Die Behandlung dieser beiden Aspekte innerhalb des vorgestellten Modellierungsrahmens ist im Folgenden beschrieben.

3.6.3.1 Technische Struktur der Applikation

Die Struktur des zu modellierenden Systems stellt die statische Sicht auf alle Komponenten dar, die die relevanten Algorithmen und Datenstrukturen des Applikationsmodells enthalten. Ausgangspunkt dafür die Basisarchitektur, die in Abschnitt 3.3 beschrieben ist. Sämtliche Basisklassen und Schnittstellen, die dort enthalten sind, können dabei genutzt werden. Zur Darstellung der strukturellen Sicht eignen sich UML-Klassen- und Komponentendiagramme. Ein Beispiel hierfür findet sich im Rahmen der Referenzstudie in Abschnitt 4.2.2.2.

3.6.3.2 Datenstrukturen

Zur effizienten Ablage einer großen Menge von Fahrzeug- und Infrastrukturinformationen, die bei der Simulation großräumiger Straßenverkehrsszenarien anfällt, sind zugriffszeit- und speicherplatzoptimierte Datenstrukturen unumgänglich. Hierbei ist die jeweilige konkrete Nutzung zu berücksichtigen. Für typische Objektarten, die im Rahmen der Simulation Intelligenter Verkehrssysteme vorkommen, enthält Tabelle 3.6 Vorschläge für effiziente Datenstrukturen, die jeweils zur Abbildung relevanter Objekte sinnvoll sind. Die Tabelle enthält eine Abschätzung der Laufzeit der Zugriffsoperationen *Iteration* über alle Elemente, *Suche* und *Sortierung* nach einem konkreten Element in der *O-Notation*, die eine asymptotische *Average-Case-Laufzeit* abschätzt. Dies bedeutet, dass die Zugriffszeit im durchschnittlichen Fall in Abhängigkeit der Anzahl an enthaltenen Elementen (z. B. Fahrzeuge oder V2X-Nachrichten) mit der in der O-Notation angegebenen Funktion ansteigt. $O(n)$ bedeutet damit eine Laufzeitentwicklung, die linear mit der Anzahl n der enthaltenen Elemente ansteigt. $O(1)$ bedeutet konstante, also von der Anzahl der Elemente unabhängige Laufzeit. Weitere Ausführungen zu Laufzeitanalysen finden sich in [WEGENER 2003].

Objekt	Datenstruktur	Mittlere Laufzeitkomplexität
Fahrzeuge	Hashtabelle	Iteration: $O(n)$ Suche: $O(1)$ Sortierung: $O(n * \log(n))$
Umgebungstabelle	Liste	Iteration: $O(n)$ Suche: $O(n)$ Sortierung: $O(n * \log(n))$
Zusammenhangskomponente	Liste	Iteration: $O(n)$ Suche: $O(n)$ Sortierung: $O(n * \log(n))$
Ereignisse	Liste (in Ereignisaggregat)	Iteration: $O(n)$ Suche: $O(n)$ Sortierung: $O(n * \log(n))$

Tabelle 3.6 Empfohlene Datenstrukturen zur Speicherung von relevanten Objekten für die Modellierung von Intelligenten Verkehrssystemen.

3.6.3.3 Eingangsparmeter

Die Eingangsparmeter des Systemmodells enthalten alle unabhängigen Variablen, für die angenommen wird, dass sie das Modellverhalten und die Stellgrößen als Ergebnis der Modellberechnungen so beeinflussen, dass sie eine Wirkung auf den Verkehr generieren. Ob dieser Einfluss tatsächlich gegeben ist, kann anhand der in Abschnitt 3.7 erläuterten Sensitivitätsanalysen ermittelt werden. Die Menge der Eingangsparmeter ist dann in einem iterativen Prozess entsprechend anzupassen.

Die Menge der Eingangsparmeter E setzt sich zusammen aus den im Folgenden beschriebenen Umgebungsvariablen U und Systemparametern P :

$$E = U \cup P \quad (3.3)$$

Umgebungsvariablen Als Umgebungsvariablen werden Eingangsgrößen bezeichnet, die durch die Umwelt, die Verkehrsinfrastruktur oder umliegende Fahrzeuge bestimmt werden und auf das Ego-Fahrzeug in entscheidender Weise einwirken. Derartige Größen können nicht aktiv im Rahmen einer Systemkonfiguration beeinflusst werden.

Die Menge U der n Umgebungsvariablen wird bezeichnet als

$$U = \{u_1, \dots, u_n\} \quad (3.4)$$

Systemparameter Systemparameter sind unabhängige Variablen eines Systems oder Modells, die aktiv und bewusst konfiguriert werden, um das System- oder Modellverhalten zu optimieren oder eine angestrebte Systemkonfiguration bewusst anzupassen.

Die Menge P der m Systemparameter wird bezeichnet als

$$P = \{p_1, \dots, p_m\} \quad (3.5)$$

3.6.3.4 Systemausgabe

Die Systemausgabe orientiert sich an den Wirkparametern für die Beeinflussung des Verkehrs gemäß Abschnitt 2.1.7. Dabei ist zu unterscheiden zwischen einer angestrebten *aktiven* oder *passiven* Beeinflussung. Der Zusammenhang zwischen Eingangsparametern und Systemausgabe ist für beide Fälle systematisch in Bild 3.17 illustriert.

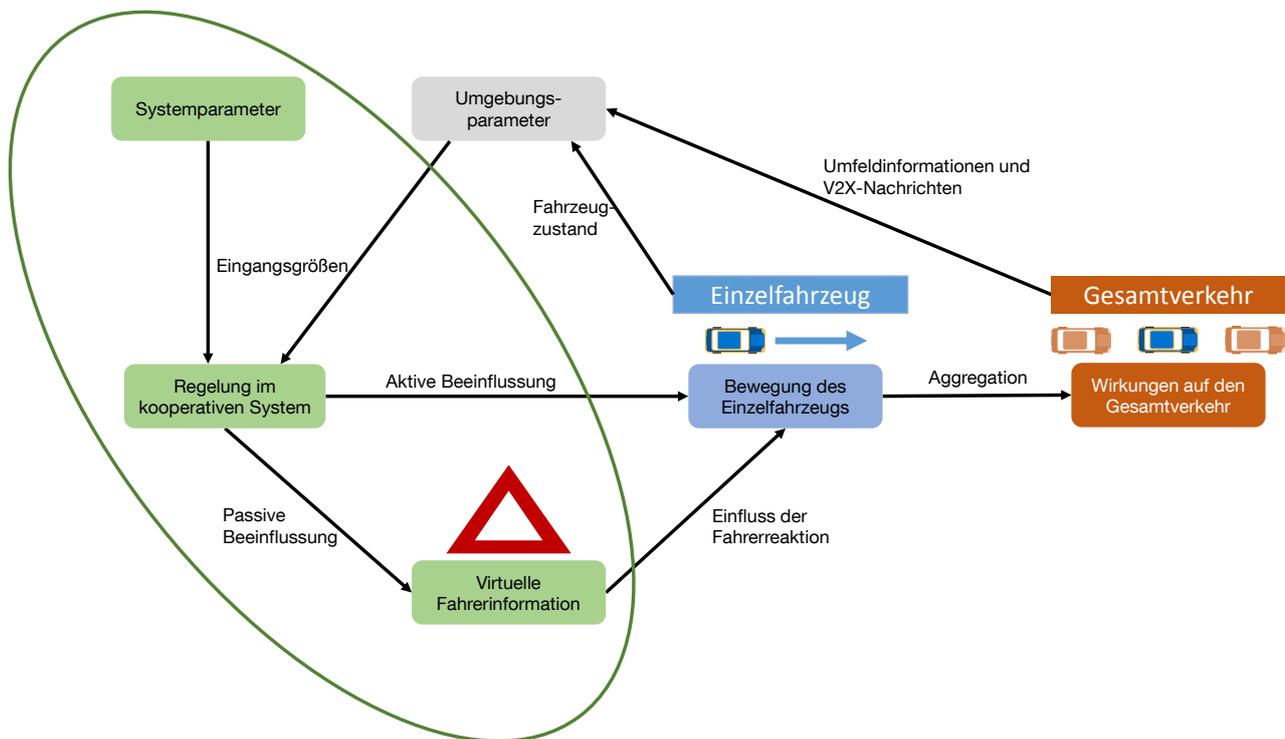


Bild 3.17 Schematische Darstellung der Verkehrsbeeinflussung durch ein modelliertes kooperatives Verkehrssystem. Die Komponenten des Systemmodells sind grün markiert. Eigene Darstellung.

Aktive Beeinflussung Bei einer aktiven Beeinflussung muss die Auslegung eines Systemmodells eine, zwei oder alle drei der Stellgrößen Beschleunigung, Fahrstreifenwechsel und Fahrtroute direkt regeln. Die Ausprägung der Beeinflussung richtet sich nach dem entsprechend Abschnitt 3.6.5.1 definierten Systemzustand.

Die Menge R der m Systemausgabevariablen (angelehnt an die Regelungstechnik auch *Regelgröße* genannt) wird bezeichnet als

$$R = \{r_1, \dots, r_n\} \subseteq \{a, ln, dr\} \quad (3.6)$$

mit

a = neue Fahrzeugbeschleunigung

ln = neuer Wunschfahrstreifen

dr = neue Wunschroute

Passive Beeinflussung Für den Fall der passiven Beeinflussung wird als Systemausgabe eine virtuelle Fahrerinformation oder -warnung angenommen. Das System greift dann nicht direkt in die Fahrzeugaktork ein, sondern generiert Empfehlungen für den Fahrer des Fahrzeugs. Dies kann entweder über Einrichtungen der Straßeninfrastruktur, wie etwa dynamische Verkehrszeichen oder über ein Display im Fahrzeug geschehen.

In diesem Fall ist die Systemausgabe genau die Ausprägung der ausgegebenen Information (z. B. eine Geschwindigkeitsempfehlung oder ein Warnsymbol):

$$c = \{c_1, \dots, c_n\} \subseteq C \quad (3.7)$$

Wobei die Menge C alle Codes für die in der Spezifikation des Systems vorgesehenen Informationsvarianten enthält. Die Systemausgabe c enthält hierbei eine oder mehrere Instanzen dieser Varianten. Weiterhin ist für jeden dieser Anzeigecodes ein zugehöriges erwartetes Fahrverhalten zuzuordnen. Dieses Fahrverhalten ist dann wiederum die Stellgröße für die Fahrzeugaktork. Für die Übertragung einer Fahrerinformation auf das resultierende Fahrverhalten und die sich ergebenden Stellgrößen der Aktork der Fahrer-Fahrzeug-Einheiten wird auf [HOFFMANN 2013] verwiesen. Ein Beispiel für eine Menge von Codierungen für spezielle Systemausgaben in Form von virtuellen Display-Anzeigen ist in Tabelle 3.7 aufgeführt.

3.6.3.5 Beeinflussungsstrategie

Nachdem alle Ein- und Ausgangsgrößen sowie der Ablauf des Systems spezifiziert sind, ist im Detail formal zu beschreiben, mit welchen funktionalen Beziehungen und Algorithmen die Systemausgabe R in jedem Endzustand aus den Mengen der Eingangsgrößen U

Code	Bezeichnung	Bild	Beeinflusste Parameter
c_1	Information		v_{wunsch}
c_2	Warnung		v_{wunsch}, ln_{wunsch}
c_3	Akute Warnung		v_{wunsch}

Tabelle 3.7 Beispiel für eine Codierung verschiedener Systemempfehlungen an einzelne Fahrer.

und P berechnet wird. An dieser Stelle werden alle dafür relevanten Algorithmen in einer analytischen Darstellung beschrieben.

$$R = f(U, P) \quad (3.8)$$

Abschnitt 4.2.7 zeigt ein ausführliches Beispiel im Rahmen der Referenzstudie.

3.6.4 Nicht-funktionale Anforderungen

Zu den nicht-funktionalen Anforderungen (auch Qualitätsanforderungen genannt) zählen im Software-Engineering u. a. Aspekte wie Bedienbarkeit einer Software, Zuverlässigkeit oder auch das Laufzeitverhalten und der Speicherbedarf. Im Bereich der Modellierung Intelligenter Verkehrssysteme zur effizienten Verkehrssimulation sind insbesondere die beiden letzteren relevant. Eine gute Skalierbarkeit hinsichtlich der Simulationsdauer und des Verbrauchs an Speicherplatz kann entscheidend sein vor dem Hintergrund, dass einzelne Systemmodelle nicht selten in mehreren tausend Fahrzeugen während eines Simulationslaufes quasi-parallel durchlaufen werden. Quasi-parallel bezeichnet hierbei den Ablauf aus Sicht der Simulationsanwendung, die mit der Anwendung synchronisiert ist. Dies bedeutet, dass am Ende eines jeden Simulationszeitschrittes alle Fahrzeuge und Infrastrukturelemente bereits vollständig durchlaufen und gegebenenfalls beeinflusst wurden. Für die Simulation ist nicht relevant, dass die Applikationsausführung innerhalb jedes diskreten Zeitschritts einen seriellen Prozess durchläuft.

3.6.4.1 Laufzeitbetrachtungen

Dieser Abschnitt enthält Überlegungen zur Analyse und Optimierung der Laufzeit für die zu modellierenden Anwendung im Zuge der Simulationsausführung.

Laufzeitanforderungen: Grundsätzlich sind Laufzeitanforderungen bestimmt durch die angestrebte Laufzeit der gesamten Verkehrssimulation bei Nutzung des zu untersuchenden Systems. Bei Simulationen spielt das Echtzeitverhältnis r_{tr} eine große Rolle. Dabei handelt es sich gemäß [MOLTENBREY 2009] um das Verhältnis von *Echtzeit* t_{sim} , der tatsächlichen Zeit, die durch die Simulation abgedeckt wird, zur *Simulationszeit* t_{wall} (auch *wall clock time* genannt), der Zeit, die der Rechner zur Durchführung der Simulationen benötigt:

$$r_{tr} = \frac{t_{sim}}{t_{wall}} \quad (3.9)$$

Eine pauschale Aussage zum optimalen Wert für das Echtzeitverhältnis ist nicht möglich. Dies hängt stark von der Zielrichtung der Untersuchung ab:

1. Bei der Simulation weniger großer Szenarien zur vereinfachten und aggregierten Veranschaulichung bestehender oder kurzfristig prognostizierbarer Sachverhalte ist ein hohes Echtzeitverhältnis größer als 1 anzustreben.
2. Bei verschiedenen schwer prognostizierbaren Zukunftsszenarien, deren Zweck in der Evaluierung möglicher Wirkungen von Systemen oder Maßnahmen im Verkehr unter verschiedenen variierten Randbedingungen liegt, ist es meist nicht von entscheidender Bedeutung, dass die Simulation schneller als in Echtzeit durchgeführt werden kann. In diesem Fall ist eine evtl. komplexere und länger andauernde Simulation vorzuziehen.

Das tatsächliche Echtzeitverhältnis kann erst während der Simulationen unter Nutzung des zu untersuchenden Systems ermittelt werden. Einige Simulationswerkzeuge geben das Echtzeitverhältnis direkt in der Benutzeroberfläche oder einer Textkonsole aus. Andernfalls kann es mittels einer (Software-)Stoppuhr ermittelt werden.

Abschätzung der Laufzeit: Potentiell rechenintensive Berechnungen werden in den Zustandsübergangsfunktionen, die in Abschnitt 3.6.5 beschrieben werden, sowie bei der Ermittlung der Stellgrößen in den jeweiligen Endzuständen durchgeführt. Im Hinblick auf die Qualitätsanforderungen, die im Zuge der nicht-funktionalen Spezifikation definiert wurden, kann eine Analyse der Laufzeitkomplexität für alle diese Funktionen vorgenommen werden. In Simulationsstudien, bei denen angebundene Modelle Intelligenter Verkehrssysteme untersucht werden, haben folgende Faktoren üblicherweise entscheidenden Einfluss:

- Iteration aller oder einer Teilmenge aller Fahrzeuge im Simulationsnetz. Dies ist praktisch immer notwendig, da grundsätzlich eine (Teil)menge von Fahrzeugen beeinflusst werden soll, die aus der Menge aller Fahrzeuge zu extrahieren ist. Diese Operation hat damit eine algorithmische Komplexität von $O(n)$ über die Anzahl der n Fahrzeuge, die dadurch einen direkten Einfluss auf die effektive Simulationszeit hat.
- Größe des zu untersuchenden Netzmodells. Je größer das Netzmodell ist, desto mehr Fahrzeuge können im Netz vorhanden sein.
- Ermittlung der Fahrzeuge, die eine ausgesendete virtuelle V2X-Nachricht empfangen aus der Menge der n Fahrzeuge. Diese Laufzeit multipliziert sich wiederum mit der Anzahl der m ausgesendeten Nachrichten und ergibt sich damit zu $O(n * m)$
- Routensuche mittels Routingverfahren. Sofern die Beeinflussung durch das modellierte System auf strategischer Ebene stattfindet, also die Beeinflussung der Fahrzeugroute zum Ziel hat, ist die Betrachtung der Laufzeit von entscheidender Bedeutung. So benötigt beispielsweise der bekannte Dijkstra-Routingalgorithmus zur Suche kürzester Wege in einem Netzgraphen eine mittlere asymptotische Laufzeit von $O(v^2)$ über die Anzahl v der betrachteten Knoten im Netzgraphen. Details zum Dijkstra-Algorithmus und Betrachtungen zu dessen Laufzeitkomplexität finden sich beispielsweise in [WEGENER 2003].
- Laufzeitkomplexität der Regelstrategie des Systems. Diese ist abhängig von der Systemspezifikation.

Über die einzelnen Komponenten, die einen Einfluss auf die Laufzeitkomplexität ausüben, kann eine Abschätzung der Laufzeit des kompletten Ablaufs ermittelt werden. Dies zeigt folgendes Beispiel mit folgenden Annahmen:

1. Iteration über alle n Fahrzeuge: $O(n)$
2. Versand von m Nachrichten und Ermittlung der empfangenden Fahrzeuge aus allen n Fahrzeugen: $O(n * m)$
3. Exemplarischer Warnalgorithmus, der für jedes Fahrzeug über die Anzahl e der aus empfangenen Nachrichten ermittelten Ereignissen iteriert und anschließend jeweils eine neue Route über v Knoten berechnet: $O(n * e + n * v^2)$

Diese Annahmen ergeben folgende Abschätzung für die Gesamtlaufzeit:

$$O(n * m + n * e + n * v^2) = O(n * (e + m + v^2)).$$

mit

n = Anzahl der Fahrzeuge im betrachteten Netzabschnitt

m = Anzahl empfangender Nachrichten

e = Anzahl der aus empfangender V2X-Nachrichten berechneten Ereignisse

v = Anzahl der Knoten im Streckennetz

Da die Anzahl der v Knoten im Netz statisch ist und die Annahme besteht, dass sie schnell gegenüber der Anzahl der empfangenen Nachrichten und erzeugten Ereignissen vernachlässigbar klein wird, kann eine Vereinfachung vorgenommen werden zu

$$O(n * (e + m)).$$

Reduzierung der Laufzeitkomplexität: Die im vorangehenden Absatz erläuterten Faktoren, die einen direkten Einfluss auf die Laufzeit der Simulation haben, sind primärer Gegenstand möglicher Laufzeitorientierter Optimierungen.

Während die Iteration über alle Fahrzeuge in jedem simulierten Zeitschritt im Normalfall nicht umgangen werden kann, ist es möglich, den spezifischen Zugriff auf ein einzelnes Fahrzeug zu optimieren. vtSim bietet dazu die Nutzung eines Fahrzeug-Containers vom Java-Typ HashMap an, der die üblicherweise genutzte Fahrzeugliste ersetzt. Mithilfe der HashMap ist der Zugriff auf ein Fahrzeug-Objekt in konstanter Zeit $O(1)$ möglich. Insbesondere ist damit eine mehrfache Iteration über alle Fahrzeuge zu vermeiden, wenn die Applikation Informationen über andere Fahrzeuge benötigt. Da dies nicht immer umgangen werden kann (z. B. zur zusätzlichen Ermittlung empfangender Fahrzeuge für eine V2X-Nachricht), sollten Anfragen an weitere Iterationen miteinander verknüpft werden. Die Laufzeitkomplexität kann damit grundsätzlich von $O(n^{2+k})$ auf maximal $O(n^2)$ reduziert werden.

Weitere Optimierungsmöglichkeiten sind applikationsspezifisch. Betrachtungen dazu finden sich im Rahmen der Sensitivitätsanalysen in Abschnitt 3.7.5.

3.6.4.2 Speicherbedarf

Während der rechnerbasierten Simulation müssen spezifische Informationen für eine große Zahl an Elementen in den Hauptspeicher des Rechners geladen werden. Bei diesen Elementen handelt es sich neben Infrastrukturobjekten (insbesondere Straßenabschnitten), Fahrzeugen mit allen ihren Parametern auch um Messdaten, die während der Simulation

aufgezeichnet werden. Aus diesem Grund ist ein sorgfältiger Umgang mit speicherintensiven Datenstrukturen unerlässlich. Die Referenzapplikation und die entsprechend vorgesehenen Softwarekomponenten in diesem Rahmenwerk tragen diesem Umstand Rechnung, indem konsequent alle Datenspeicher explizit am Ende eines Simulationszeitschritts geleert werden, sofern sie in späteren Zeitschritten nicht mehr benötigt werden.

Außerdem erfolgt eine sorgfältige Auswahl und Empfehlung geeigneter und effizienter Datenstrukturen zur effizienten Ablage aller relevanter Informationen in Abschnitt 3.6.3.2.

3.6.5 Zustandsmodellierung

Zur Ablaufspezifikation der Systemmodelle wird eine formale Beschreibung des Systemablaufs mittels Zustandsautomaten vorgeschlagen. Dies bedeutet, dass der Ablauf des zu modellierenden Verkehrssystems entsprechend des *State Design Pattern* aus der Softwaremodellierung, wie in Abschnitt 2.7.2 erläutert, beschrieben wird.

Ein großer Vorteil der Zustandsdarstellung ist die Zerlegung in klar definierte und leicht überschaubare Fixpunkte im Funktionsablauf und daher eine leicht verständliche Systemarchitektur, was für eine übersichtliche Veranschaulichung und Beurteilung der Modellbildung sehr wertvoll ist.

Eine zustandsorientierte Sicht umfasst zwei Aspekte, die beim hier vorgeschlagenen Modellierungsansatz gemeinsam betrachtet werden:

- Zustände jedes einzelnen betrachteten Fahrzeugs und dessen Fahrer (*Fahrer-Fahrzeug-Einheit*),
- Zustand des technischen Systems.

Ein konkretes Beispiel für das Vorgehen ist im Rahmen der Referenzstudie in Abschnitt 4.2.4.1 zu finden.

Ein Zustandsautomat wird jeweils für jedes Fahrzeug, das durch das Systemmodell beeinflusst werden soll, in jedem Zeitschritt genau einmal durchlaufen. Das bedeutet, dass sich jedes dieser Fahrzeuge am Ende eines jeden Zeitschritts in einem definierten End- oder Systemzustand befindet, deren Bedeutung im Folgenden näher erläutert wird.

Wie in Abschnitt 2.7.2 ausgeführt, repräsentieren Zustände eine Menge aktueller Variablenwerte und Instanzen des zu modellierenden Verkehrssystems. Relevant sind hierfür die aktuellen Belegungen der Parameter des Verkehrssystems und der damit beeinflussten Fahrzeuge.

3.6.5.1 Identifikation und Beschreibung der Zustände

Der erste Schritt der Zustandsmodellierung besteht in der Identifikation und Beschreibung möglicher Zwischen- und Endzustände, in denen sich Fahrzeuge befinden können, die mit dem modellierten System ausgestattet sind. Hierbei ist eine zuvor erstellte, klar und detailliert formulierte Beschreibung gemäß Abschnitt 3.6.1 hilfreich. Jeder Zustandsautomat besitzt einen Startzustand, der die Ausgangsposition des Fahrzeugs bei dessen Einfahrt in das Simulationsnetz beschreibt. Die Situationen, die das Fahrzeug anschließend erfahren kann, sind ebenso zu definieren wie eine logische zeitliche Abfolge dieser Situationen. Die Abfolge führt zu den Zustandsübergängen.

Es kann nach vier Typen von Zuständen unterschieden werden, die in Tabelle 3.8 aufgeführt sind.

Startzustand		Start der Zustandsberechnung.
Leerer Zustand		Keine Aktion, wenn keine relevante Bedingung erfüllt ist. Ein leerer Zustand ist gleichzeitig ein Endzustand.
Kandidaten-Zustand		Einzelne, aber nicht alle Bedingungen für einen Systemzustand sind erfüllt.
Endzustand / Systemzustand		Alle Bedingungen für einen konkreten Systemzustand sind erfüllt.

Tabelle 3.8 Zustandstypen für die Ablaufmodellierung

3.6.5.2 Zustandsübergänge

Die Übergänge zwischen den zuvor definierten Zuständen bestimmen den Ablauf des Systemmodells. Ein Übergang von einem Zustand in einen bestimmten nächsten Zustand erfolgt dann, wenn eine bestimmte Übergangsbedingung erfüllt ist. Die Bedingungen stellen aus automaten-theoretischer Sicht Eingaben in den Automaten dar. Sie bestehen im Umfeld der Modellierung von Intelligenten Verkehrssystemen aus einer Belegung einer oder mehrerer Umgebungsvariablen oder Systemparameter (siehe Abschnitt 3.6.3.3). Da der Übergang von einem in den nächsten Zustand nicht nur vom vorangehenden Zustand, sondern auch von der aktuellen Eingabe abhängt, handelt es sich bei jedem derart modellierten Automaten um einen u. a. in [HOPCROFT ET AL. 2002] beschriebenen *Mealy-Automaten*.

3.6.5.3 Identifikation der Stellgrößen als Ergebnis der Endzustände

Stellgrößen sind diejenigen Ausgangswerte, die letztlich der Verkehrssimulation als Bewegungsparameter übergeben werden. Entsprechend Abschnitt 2.1.7 ist dies einer der Wirkparameter Längsbeschleunigung, Wunschfahrstreifen oder Wunschroute.

3.6.5.4 Prüfung und Minimierung des Zustandsautomaten

Knoten, die nur eine Ein- und Ausgangskante haben, können gestrichen werden. Außerdem können Äquivalenzklassen gebildet werden. Äquivalente Zustände können zu einem repräsentierenden Zustand zusammengefasst werden. Verfahren zur Bildung von Äquivalenzklassen werden hier nicht im Detail beschrieben. Sie sind z. B. in [HOPCROFT ET AL. 2002] zu finden.

3.6.6 Modellgenauigkeit

In Abschnitt 2.2.5 wurde der Zusammenhang zwischen Detaillierungsgrad und Modellkomplexität ausgeführt. Diese Erkenntnisse führen zur Notwendigkeit, die benötigte Modellgenauigkeit genau zu definieren und zu minimieren.

3.6.6.1 Einordnung in die Modellskala hinsichtlich der Fahrzeugbeeinflussung

Die Spezifikation des Systemmodells ermöglicht eine Kategorisierung hinsichtlich der Beeinflussungs- und Analysestrategie. Eine solche Kategorisierung kann an dieser Stelle der Zuordnung zu einer jeweils geeigneten *Beeinflussungsskala* dienen. Im Zusammenhang mit der Diskussion in Abschnitt 2.4 ist damit zu erwägen, welche Genauigkeit bei der Modellierung der Fahrdynamik der Fahrer-Fahrzeug-Einheiten möglich, sinnvoll und notwendig ist. Ein Vorschlag für eine Skala, die zur Einordnung verwendet werden kann, ist in Tabelle 3.9 zu finden.

3.6.6.2 Zeitliche Auflösung

Die zeitliche Auflösung der Modellierung betrifft die Frequenz der Berechnungen im Modell. Das bedeutet, dass für jeden Aufruf einer modellierten Funktionalität zu prüfen ist, wie oft und in welchem zeitlichen Abstand diese durchgeführt werden muss. Dies steht im direkten Zusammenhang mit dem Laufzeit- und Speicherbedarf der modellierten Applikation.

Die zeitliche Auflösung kann ausgehend von der ausgewählten Modellskala erfolgen. Zu unterscheiden ist dabei zwischen der Frequenz der Beeinflussung und der Frequenz der Datenauswertung, die sich unterscheiden können.

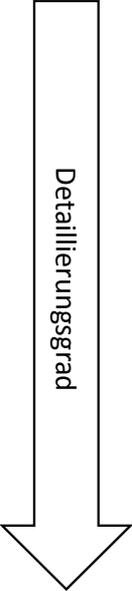
	Skala	Beeinflussungsebene	Stellgrößen	Zeitliche Auflösung
	Verkehrsfluss	Verkehrsumlegung	\bar{v} , q , k	1 - 15 min
	Routenwahl	Einzelfahrzeuge strategisch	ln_{wunsch} , Route	10 s - 1 min
	Fahrzeugpulk	Pulkbewegung	v , n_{fz} , a_{pulk}	1 - 10 s
	Passive Einzel- fahrzeugbeeinflus- sung	Zielgrößen für Simulationsmodelle	v_{wunsch} , ln_{wunsch}	1 s
	Aktive Einzelfahr- zeugbeeinflus- sung	Fahrzeugbeschleunigung und Wunschfahrstreifen	a , v , ln_{ziel}	0,1 s
	Fahrer- und Fahrzeugaktorik	Stellgrößen der Fahrzeugdynamik	Pedalstellung, Bremsdruck u. ä.	< 0,1 s

Tabelle 3.9 Skalen der Modellierung von Verkehrsbeeinflussung.

Sofern die Beschleunigung als Stellgröße in der gewählten Modellskala relevant ist, kann Bild 3.18 als Orientierung im kleinräumigen Bereich bei der Entscheidung über die benötigte zeitliche Auflösung hilfreich sein. Die Grafik zeigt auf der y-Achse die Strecke, die ein Fahrzeug in der entsprechenden Zeit (x-Achse) zurückgelegt hat, wenn eine ausgewählte konstante Beschleunigung über diesen Zeitraum angenommen wird. Für ausgewählte Werte dieser konstanten Beschleunigung sind im Bild die entsprechenden Verlaufskurven der zurückgelegten Wegstrecken als Kurvenschar eingezeichnet. Die blauen Kurven stellen dafür die entsprechenden Verläufe für alle Beschleunigungswerte zwischen $0 \frac{m}{s^2}$ und $0,5 \frac{m}{s^2}$ in Schritten von jeweils $0,1 \frac{m}{s^2}$ dar.

Tabelle 3.10 zeigt die Verknüpfung möglicher Modellierungsskalen mit den entsprechenden Auswertungsskalen. Für jede sinnvolle Kombination ist der Bereich der zeitlichen Auflösung eingetragen, der für die jeweilige Modellierungs- und Analyseskala notwendig und sinnvoll ist. Nicht sinnvolle Kombinationen sind mit „-“ gekennzeichnet.

3.6.7 Festlegung des zeitlich-räumlichen Untersuchungsbereichs

Jede Simulationsumgebung kann und soll sowohl zeitlich als auch räumlich nur einen begrenzten Bereich abdecken. Das bedeutet, dass zum einen ein relevanter Zeitraum, in dem relevante Interaktionen erfasst werden können, als auch ein Streckennetz in geeigneter Ausdehnung für die Simulation festgelegt werden müssen. Vorgaben hierzu sind auch in [FGSV 2006] und [PARK UND WON 2006] zu finden.

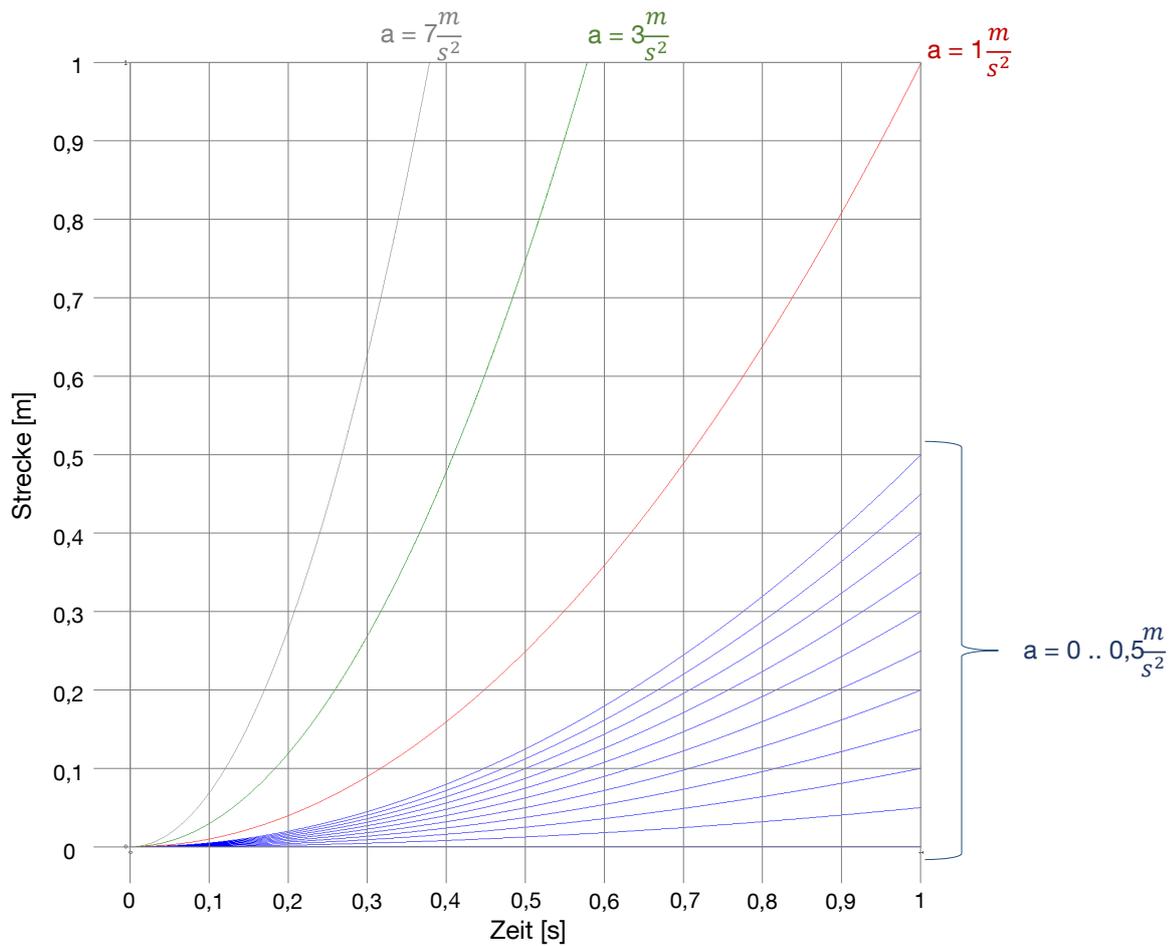


Bild 3.18 Darstellung der zurückgelegten Strecke über die Zeit bei konstanter Beschleunigung für verschiedene Beschleunigungswerte. Eigene Darstellung.

		Analyseskala		
		Makro	Meso	Mikro
Modellierungsskala	Makro	1 .. 15 min	-	-
	Routen	10 s .. 1 min	10 s .. 1 min	10 s .. 1 min
	Pulks	1 .. 10 s	1 .. 10 s	-
	Passiv	1 s	-	1 s
	Aktiv	0,1 s	-	0,1 s
	Aktorik	< 0,1 s	-	0,1 s

Tabelle 3.10 Mögliche Kombinationen und zeitliche Auflösungen zwischen Modellierungs- und Analyseskalaen.

3.6.7.1 Zeitlicher Untersuchungsbereich

Zur Bestimmung des relevanten Simulationszeitraums spielen zwei Faktoren eine Rolle:

1. Die **Untersuchungsdauer**, die von der Häufigkeit relevanter Ereignisse in der Simulation abhängt und ausreichend sein muss, um eine genügend große Anzahl solcher Ereignisse abzudecken.
2. Der **Startzeitpunkt** der Untersuchung. Bevor eine repräsentative Verkehrssituation im simulierten Streckennetz vorherrscht, müssen erst in das gesamte Netz Fahrzeuge eingefahren sein und an jedem Ort in diesem Netz eine *stationäre* Verkehrssituation vorherrschen. Diese *Vorlaufzeit* kann gemäß Formel 3.10 angenähert werden anhand der Dauer t_{vor} , die ein Fahrzeug mit der auf jeder der n befahrenen Strecken jeweils geltenden zulässigen Höchstgeschwindigkeit $v_{zul,i}$ die längste im Netz mögliche Route (mit der Länge l_{max}) komplett durchfahren hat.

$$t_{vor} = \frac{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n v_{zul,i}}{l_{max}} \quad (3.10)$$

Die Zusammenhänge zwischen Simulationszeit, Vorlaufzeit und Untersuchungszeit sind in Bild 3.19 aus [FGSV 2006] anschaulich dargestellt.

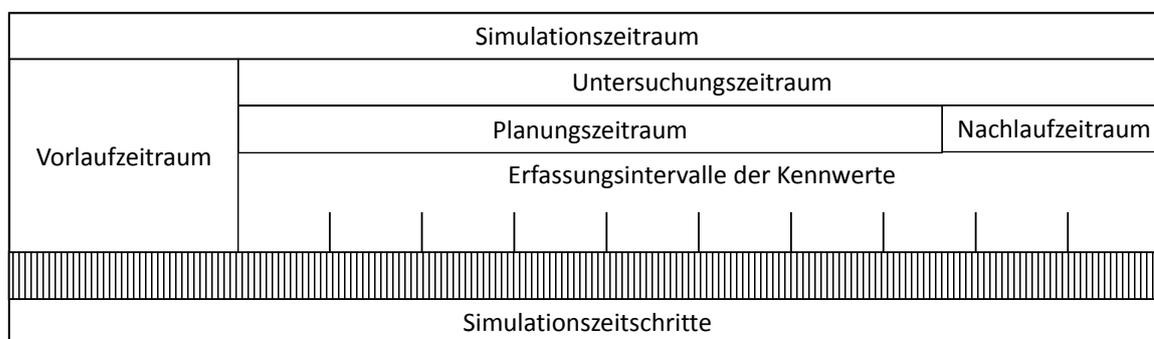


Bild 3.19 Zeitliche Abgrenzung von Simulationszeit, Vorlaufzeit und Untersuchungszeit. Quelle: [FGSV 2006]

3.6.7.2 Räumlicher Untersuchungsbereich

Als Untersuchungsbereich wird der räumliche Bereich bezeichnet, innerhalb dessen während der Analysen Daten aufgezeichnet und damit die geplanten Sensitivitäts- oder Wirkungsanalysen durchgeführt werden. Zur Bestimmung des für die Analyse relevanten Teilbereiches aus dem verwendeten Streckennetz sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Ausdehnung der Beeinflussungsstrategie. Wird beispielsweise die Routenwahl beeinflusst und werden Alternativroutenszenarien betrachtet, muss in der Regel das gesamte großräumige Netzmodell analysiert werden.
- Bei Applikationen, die kleinräumig, also etwa entlang eines definierten Streckenabschnittes die Längsdynamik einzelner Fahrzeuge beeinflussen, ist zu betrachten, wie viel räumlichen Vorlauf die Funktionalität benötigt, um eine Beeinflussung zu initiieren. Dies betrifft beispielsweise den Empfangsbereich von ausgesendeten V2X-Nachrichten bei kooperativen Warnfunktionen.
- Weiterhin ist zu betrachten, in welchem Bereich Wirkungen überhaupt möglich sind, die durch das untersuchte Verkehrssystem ausgelöst werden. Bestimmte Anwendungen haben beispielsweise einen Relevanzbereich (siehe Abschnitt 3.3.1.6), außerhalb dessen keine Beeinflussung stattfindet.

Eine wichtige Feststellung ist auch, dass die Wirkungsuntersuchungen auf den Gesamtverkehr immer auch Fahrzeuge mit einschließen, die nicht durch das System beeinflusst werden. Je größer der räumlich-zeitliche Auswertebereich ist, desto größer ist die Anzahl der nicht beeinflussten Fahrzeuge, da außerhalb des Relevanzbereichs eines beeinflussenden Systems auch die ausgestatteten Fahrzeuge unbeeinflusst sind und der Anteil der unbeeinflussten Fahrzeuge dort entsprechend höher ist. Dies bedeutet, dass bei Vergrößerung des Auswertebereichs auch die Gesamtwirkung schwächer ausgeprägt ist. Dieser Sachverhalt ist in Bild 3.20 veranschaulicht.

3.7 Sensitivitätsanalysen zur Modelloptimierung

Im folgenden Abschnitt wird die Vorbereitung und Durchführung der Analysestudien beschrieben, mit Hilfe derer auf Basis der vorangehenden Ausführungen Parametersensitivitätsanalysen mit verschiedenen Zielrichtungen sowie erste Wirkungsanalysen im Verkehr durchgeführt werden können.

3.7.1 Konzept der Sensitivitätsanalysen zur IVS-Modellierung

Theoretische Grundlagen zu Sensitivitätsanalysen sind in Abschnitt 2.3 erläutert. Im folgenden Abschnitt ist beschrieben, wie bei der konkreten Ausgestaltung der Analysen zur Modellierung von Verkehrssystemen vorzugehen ist. In diesem Rahmenwerk wird eine Screening-Methode entsprechend Abschnitt 2.3 vorgeschlagen, bei der einzelne Parameter festgehalten werden, während für andere die gesamte Eingabe für den Parameterraum verwendet wird. Das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse kann anschließend für die vier in

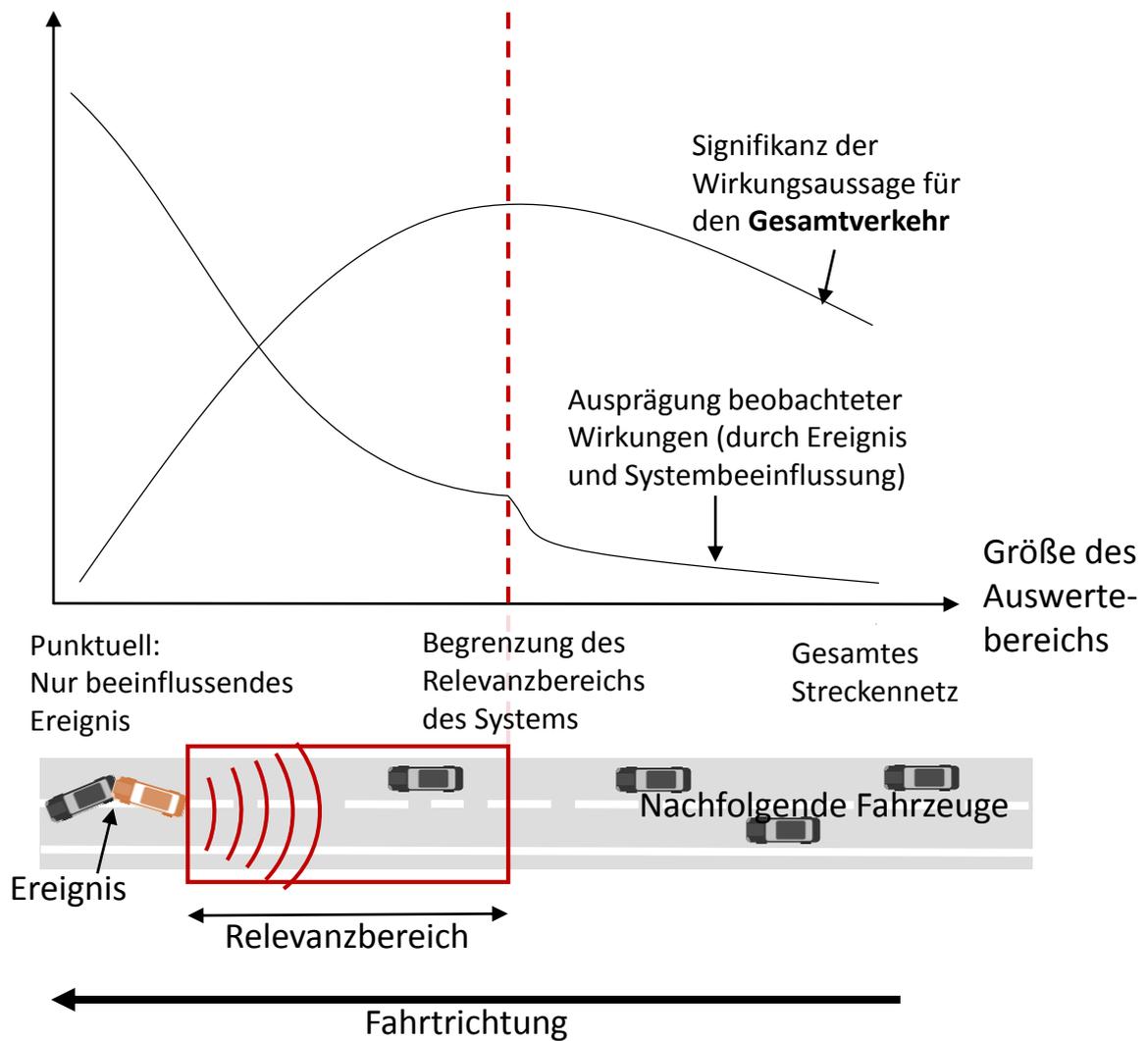


Bild 3.20 Ausprägung der Beeinflussung durch ein Verkehrssystem und Signifikanz der Wirkungsaussage im Gesamtverkehr in Abhängigkeit des Auswertebereiches. Schemadarstellung, nicht maßstabsgetreu. Eigene Darstellung.

Tabelle 3.11 aufgeführten Zwecke *Reduktion der Modellkomplexität*, *Funktionsoptimierung*, *Modellvalidierung* sowie *Wirkungsanalyse im Verkehr* genutzt werden.

1.	Reduktion der Modellkomplexität	Erkennung und gegebenenfalls Entfernung nicht sensitiver Parameter.
2.	Funktionsoptimierung	Identifikation des optimalen Werte(bereich)s für einen Parameter.
3.	Modellvalidierung	Identifikation von Korrelationen zwischen Ein- und Ausgabeparametern gemäß Spezifikation.
4.	Wirkungsanalyse im Verkehr	Interpretation der Varianz- und Mittelwertunterschiede zwischen den Szenarienergebnissen.

Tabelle 3.11 Vier zentrale Ziele der Sensitivitätsanalysen.

Für diese vier Ziele sind unterschiedliche Voraussetzungen zu erfüllen:

1. Der Anzahl der Werte für alle Parameter (Parameterstichprobe) ist groß genug, um eine hinreichend genaue Aussage durch die Ergebnisse zu erzielen (betrifft Zweck 1. und 2. aus Tabelle 3.11).
2. Der Wertebereich für die Parameter ist repräsentativ, deckt also Werte ab, die tatsächlich für das System in der gegebenen Umgebung erreicht werden können (betrifft Zweck 3. und 4. aus Tabelle 3.11).
3. Die Anzahl der durchgeführten Simulationsläufe ist ausreichend, um signifikante und nicht durch Zufallsereignisse zustande gekommene Ergebnisse zu erzielen (betrifft Zweck 4. aus Tabelle 3.11).

3.7.1.1 Sensitive Parameter

In der Liste der potentiell beeinflussenden Parameter sind diejenigen zu bestimmen, für die die Sensitivität untersucht werden soll. Prinzipiell können alle aufgelisteten Parameter gewählt werden. Dann ist eine sichere und umfassende Analyse möglich. Allerdings ist es in der Regel sinnvoll einzelne Werte als gegeben anzunehmen und von der Sensitivitätsanalyse auszuschließen. Der zeitliche Aufwand der Analysen kann reduziert werden, wenn für einzelne Parameter mittels Expertenwissen bereits sicher festgestellt werden kann, dass sie unverzichtbar sind.

Allgemeine Parameter sind, neben anderen, folgende:

- Kommunikationsreichweite für V2X-Anwendungen (beeinflusst die Größe der Umgebungstabelle),

- Senderate für V2X-Nachrichten,
- virtuelle HMI-Warnstufen,
- Relevanzbereiche.

Spezifische Systemparameter sind Stellgrößen für den Funktionsalgorithmus einer speziellen Anwendung, wie etwa den Regelkreis eines Fahrerassistenzsystems. Beispiele für derartige spezifische Parameter finden sich für die Beispielapplikation der Referenzstudie in Abschnitt 4.2.5.2

3.7.1.2 Generierung einer Parameterstichprobe als Grundlage für die Sensitivitätsanalyse

Das Vorgehen bei einer Sensitivitätsanalyse ist in Abschnitt 2.3 erläutert. In Abschnitt 2.3.4.1 ist insbesondere erwähnt, dass Stichprobenverteilungen für mögliche Eingangsparameter auf verschiedene Arten generiert werden können.

Eine geläufige Methode ist die Generierung von Verteilung und gegebenenfalls Extrapolation häufig genutzter oder empirisch untersuchter Werte. Häufig kann eine solche Verteilung durch Aufstellung einer Stichprobe aus Expertenwissen erstellt werden.

3.7.1.3 Konfiguration der Sensitivitätsanalyse

Zur Konfiguration der jeweils verwendeten Parameterwerte im Rahmen der Analyse wird die in Abschnitt 3.3.2.2 erläuterte Konfigurationsdatei verwendet. Außerdem muss die verwendete Simulationsanwendung vorbereitet werden, indem entsprechende Konfigurationsdateien angelegt und die jeweils spezifischen Modelleingaben parametrisiert werden. vtSim enthält eine vorkonfigurierte Modelleingabedatei für das in Abschnitt 3.5.1 erläuterte Referenznetz zur Nutzung im Simulationspaket VISSIM. vtSim bietet zudem die Möglichkeit, aus georeferenzierten Informationen, wie z. B. einer OpenStreetMap-Karte oder anderen Geoinformationssystemen sowie zusätzlicher Eingabedaten, wie etwa Detektormessungen von Messquerschnitten an Autobahnen, automatisiert Netzmodelle für verschiedene Simulationsanwendungen zu generieren und zu versorgen. Die Funktionalitäten von vtSim sind in Abschnitt 3.2 näher beschrieben.

3.7.1.4 Konfiguration und Kalibrierung der zugrunde liegenden Simulationsmodelle

Sinnvoll kalibrierte Fahrverhaltens- und Verkehrsmodelle sind eine wichtige Grundlage für realitätsnahe Simulationen. Entscheidender für den Vergleich mehrerer Alternativszenarien, wie etwa verschiedener Systemauslegungen, ist jedoch, dass die jeweiligen Unterschiede

in den Ergebnissen als gültig angenommen werden können. Daher liegt der Schwerpunkt der Kalibrierung nicht notwendigerweise auf einer Abbildung der Realität in jeder Ausprägung der Szenarien. Die Kalibrierung von Fahrverhaltens- und Steuerungsmodellen zur Untersuchung von Fahrerassistenzsystemen in der Verkehrssimulation wurde unter anderem von FELLENDORF UND VORTISCH [2001], DETERING [2011] und HOFFMANN [2013] für unterschiedliche Situationen beschrieben. In den hier vorliegenden Referenzstudien werden die dort erarbeiteten Erkenntnisse und Empfehlungen verwendet.

3.7.1.5 Berechnung der Anzahl der benötigten Simulationsläufe

Sobald alle Modelle konfiguriert sind, können initiale Simulationsläufe gestartet werden, die die Grundlage der Berechnung der benötigten Anzahl an Simulationsläufen bilden. Um aussagefähige Varianzen in den Kenngrößen ermitteln zu können, müssen die Mittelwerte von mindestens drei initialen Simulationsläufen mit entsprechend mindestens drei verschiedenen Startzufallszahlen vorliegen. Die zur späteren Auswertung relevanten Kenngrößen müssen dazu in jedem Simulationslauf in jedem Zeitschritt für jedes Fahrzeug in eine Trajektorien-datei geschrieben werden. Die drei (oder mehr) resultierenden Trajektorienprotokolle können anschließend von der vtSim-Analysekomponente eingelesen werden. Diese nimmt eine statistische Analyse gemäß Abschnitt 3.5.2.1 vor.

3.7.2 Implementierung des Systemmodells

Nach Abschluss der Spezifikationsphase erfolgt die Implementierung des Zustandsmodells mithilfe entsprechender Zustandsklassen und -methoden für die Zustandsübergänge in der Applikationskomponente von vtSim.

Sofern dies für die Applikation erforderlich ist, können geeignete Zusammenhangslisten (siehe Abschnitt 3.3.1.4) und zur Darstellung der Informationsdichte bei Nutzung von V2X-Kommunikation repräsentative Umgebungstabellen (siehe Abschnitt 3.3.1.5) generiert werden.

3.7.3 Durchführung der Sensitivitätsanalyse

Der Kern der Sensitivitätsanalyse besteht im automatisierten Durchlauf der Simulationen unter Benutzung des Systemmodells mit jeweils einem Wert aus dem Wertebereich der Systemparameter während der Standardwert aller anderen Parameter festgehalten wird. Sobald die Konfigurationen abgeschlossen sind, sind die entsprechenden simulationsspezifischen Einstellungen vorzunehmen, bevor anschließend die Simulation aller Szenarien angestoßen werden kann. Danach erfolgt jeweils die Vorbereitung der Simulation des nächsten Parameterwertes durch Generierung der Simulationsdatei oder der Systemkonfiguration.

Es handelt sich dabei um den zweiten Schritt des von SALTELLI [2007] vorgeschlagenen und in Abschnitt 2.3 erläuterten Prozesses (*Modellausführung*).

Zwischen den zu vergleichenden Szenarien der Sensitivitätsanalyse dürfen sich die Konfigurationen, die nicht im Zusammenhang mit den zu untersuchenden Analyseparametern stehen, nicht unterscheiden. Empfehlenswert ist in der Regel bei fahrzeugbasierten Applikationen, alle Fahrzeuge mit dem modellierten System auszustatten (100 % Ausstattungsrate), um Interaktionen zwischen ausgestatteten Fahrzeugen eindeutig identifizieren zu können.

3.7.4 Auswertung der Analysedaten

Die Ergebnisdateien der Simulation können nach Durchführung der Simulationen von der Analysekomponente von vtSim, die im Rahmen dieser Arbeit an die Erfordernisse der Sensitivitätsanalysen angepasst wurde, eingelesen werden. Dort werden die Ergebnisdaten anschließend aggregiert, aufbereitet und mittels der Statistikkomponente statistisch ausgewertet und in geeigneten Diagrammen visualisiert.

Die Parametersensitivität wird anhand der drei Darstellungen visualisiert, die in Tabelle 3.12 aufgeführt sind.

Darstellung	Interpretation	Illustration
Signifikanzmatrix	Maßzahlen für statistische Kennwerte, Signifikanz und Effektstärke.	
Box-Plot	Visualisierung der statistischen Kennwerte zum Vergleich verschiedener Szenarien	
Histogramm	Vergleichende Darstellung von Verteilungen.	

Tabelle 3.12 Drei Arten der Darstellung für Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen.

Die Grafiken in Tabelle 3.12 dienen an dieser Stelle lediglich der Illustration. Sie sind den Auswertungen der Referenzstudie entnommen. Die entsprechenden Ergebnisse werden in Abschnitt 4.5 ausführlich erläutert.

3.7.5 Reduzierung der Modellkomplexität

Das entwickelte Systemmodell soll in einem ersten Schritt auf seine Modellkomplexität hin untersucht werden. Zusammenfassend sind nachfolgend die drei Aspekte der Modellkomplexität aufgeführt, die in den Überlegungen dieses Modellierungsrahmens untersucht werden:

1. **Strukturkomplexität**, gemessen an der Anzahl der Systemmodellzustände. Eine systematische Zustandsminimierung kann den Ablauf vereinfachen (siehe Abschnitt 3.6.5).
2. **Laufzeit der Modellausführung** gemessen durch einen Vergleich der Laufzeit vor und nach der Optimierung (siehe Abschnitt 3.6.4.1).
3. **Parameterkomplexität**, gemessen an der Anzahl der verwendeten Modellparameter. Die Sensitivitätsanalyse ermöglicht die Eliminierung von Parametern, die keine relevante Signifikanz in der Variation der Belegung aufweisen.

Die ersten beiden Komplexitätsdimensionen wurden in den Abschnitten 3.6.5 und 3.6.4.1 diskutiert. Hinsichtlich des dritten Aspektes, der Parameterkomplexität, ermöglichen die Sensitivitätsanalysen eine Abschätzung des Einflusses einzelner Systemparameter und Umgebungsvariablen. Erzeugt die Variation der Werte einzelner Parameter keine signifikanten *und* inhaltlich relevanten Effekte (gemessen an der Effektstärke), ist es möglich diesen Parameter als irrelevant anzunehmen. In einer weiteren Iteration des Modellierungsprozesses kann dieser dann aus der Menge E der Eingabeparameter eliminiert und in der Regelstrategie vernachlässigt werden.

3.7.6 Optimierung der Parameterkonfiguration hinsichtlich der Systemwirkungen auf den Verkehr

Das zweite Ziel der Sensitivitätsanalysen besteht in der funktionalen Optimierung des Systemmodelles. Dies bedeutet, dass mittels Variation über die gesamte vordefinierte Parameterstichprobe ein Verlauf der Verkehrswirkungen als Ergebnis der Sensitivitätsanalysen aufgezeigt wird. Mithilfe der Darstellungen aus Abschnitt 3.7.4 kann daraufhin auf einfache Weise ein Wert oder ein Wertebereich für eine optimale Belegung eines Parameters hinsichtlich der Wirkungen auf den Gesamtverkehr identifiziert werden. Der Screeningansatz erlaubt zudem die Betrachtung der mehrdimensionalen Variation mehrerer Parameter, so dass nicht nur der Einfluss einzelner Variablen sondern auch die Wirkung bestimmter Parameterkombinationen ermittelt werden kann. Diese Erkenntnisse können für die Systementwicklung realer Verkehrssysteme essentiell sein. Zu beachten ist, dass

hiermit nur die Wirkungen auf den Gesamtverkehr abgedeckt sind. Weitere Aspekte, wie etwa die ergonomisch sinnvollen Grenzwerte für bestimmte Konfigurationen hinsichtlich des Fahrkomforts einzelner Fahrer, müssen in gesonderten Studien betrachtet werden.

3.7.7 Modellvalidierung

Ein essentieller Teil des Modellierungsprozesses besteht in der Validierung der spezifizierten Modellfunktionalität hinsichtlich der angestrebten und spezifizierten Wirkungen des Systemmodells. Nur ein Modell, das die wesentlichen Aspekte der modellierten Phänomene hinreichend korrekt abbildet, kann als gültiges Modell für aussagefähige Untersuchungen verwendet werden. Im Folgenden werden zwei mögliche Vorgehensweisen bei der Modellvalidierung vorgeschlagen. Je nach Modellauslegung kann eine oder beide dieser Varianten verwendet werden.

3.7.7.1 Modellvalidierung mittels Abgleich der Systemwirkungen im Verkehr

Als Ergebnis der Sensitivitätsanalysen kann nach der Komplexitätsreduktion und der Funktionsoptimierung auch eine Modellvalidierung vorgenommen werden. Dazu sind ein oder mehrere Parameter gezielt auszuwählen, für die die Systemspezifikation vorsieht, dass sie entscheidende Faktoren für die verkehrsbeeinflussende Wirkung des Systems seien. Die Variation dieses oder dieser Parameter sollte bei der Auswertung der Sensitivitätsanalysen einen signifikanten und relevanten Einfluss mit der vorgesehenen Tendenz auf die Verkehrswirkung der Beeinflussung durch das Systemmodell aufweisen. Eine beispielhafte Analyse zur Validierung des Referenzsystemmodells findet sich im Rahmen der Referenzstudie in Abschnitt 4.5.1.

3.7.7.2 Modellvalidierung mittels Abgleich der Systemausgabe

Ein weiterer möglicher Ansatz zur Modellvalidierung besteht im Abgleich der Systemausgabe (siehe Abschnitt 3.6.3.4) mit dem spezifizierten Ergebnis der Regelstrategie (siehe Abschnitt 3.6.3.5). Bild 3.21 zeigt hierzu ein Beispiel für die nachgebildete kooperative fahrzeugseitige Funktion „Stauendewarnung“ aus dem Projekt sim^{TD} . Die Regelstrategie des Stauwarnsystems sieht vor, dass Fahrzeuge, die genügend Informationen über das Vorliegen eines gefährlichen Stauendes gesammelt haben, nach folgendem, hier verkürzt dargestelltem, funktionalen Zusammenhang eine Warnung vor diesem Stauende im Abstand d_{warn} bei der Fahrzeuggeschwindigkeit v_e für die Fahrer nachfolgender Fahrzeuge generieren:

$$d_{calc} = 100 + v_e * t_r + \frac{v_e^2}{2 * a_{max}} \quad (3.11)$$

$$d_{warn} = \max(\min(1100m, d_{calc}), 400m) \quad (3.12)$$

Es wurde dabei eine Reaktionszeit t_r von 2 s sowie eine maximal zuzumutende Beschleunigung a_{max} von $2 \frac{m}{s^2}$ angenommen. Die maximale Entfernung, zu der gewarnt wird, liegt bei 1100 m, die minimale bei 400 m. Der entsprechende Funktionsgraph für die Darstellung einer Warnung bei einem gegebenen Abstand zum Stauendeereignis und in Abhängigkeit der aktuell gefahrenen Fahrzeuggeschwindigkeit ist in Bild 3.21 blau eingezeichnet.

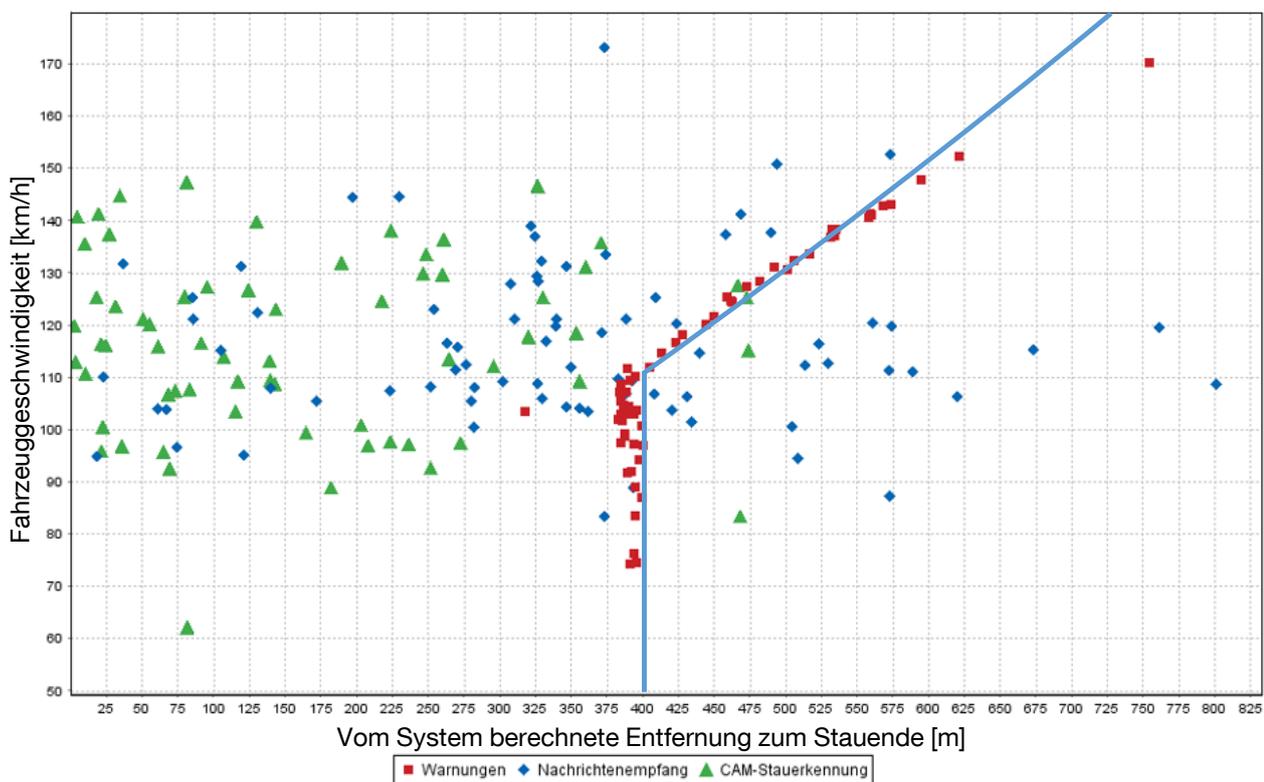


Bild 3.21 Darstellung der Systemausgabe (virtuelle Fahrerwarnungen) einer Warnung vor Stauenden in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit und des Ereignisses (Position des Stauendes). Eigene Darstellung.

Im Rahmen von sim^{TD} wurde ein Systemmodell zu diesem Stauwarnsystem entwickelt, das im Rahmen des Modellierungsprozesses validiert werden musste. Die Grafik stellt dazu die pro virtuellem Fahrzeug durch das Systemmodell erstmalig erzeugte Systemausgabe einer virtuellen Fahrerwarnung vor Stauenden (rote Quadrate) in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit und des Ereignisses (vom System ermittelte Position des Stauendes) dar. Die Warnungen ergeben sich aus der Relevanzprüfung von Ereignismeldungen für das jeweilige Fahrzeug. Die Ereignismeldungen werden entweder aus V2X-Nachrichten von anderen Fahrzeugen, die ein Stauende algorithmisch erkannt haben (blaue Rauten

illustrieren erstmaligen Empfang) oder durch Auswertung der Umgebungstabelle (Anzahl langsamer Fahrzeuge - grüne Dreiecke illustrieren erstmalige Stauerkennung) generiert. Das Bild zeigt den Verlauf der ersten Warnung in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit. Je näher das zu warnende Fahrzeug an das Stauende herankommt, desto niedriger ist die Schwellengeschwindigkeit, ab dem es gewarnt werden soll. Bei einem Abstand von mindestens 400 m werden Fahrzeuge grundsätzlich unabhängig von der Geschwindigkeit gewarnt. Dies entspricht genau der spezifizierten und in der Realfunktion vorgesehenen Ausgabe von Warnungen.

Für andere Arten von Modellen sind die wesentlichen Systemausgabeparameter, die in der Spezifikation der Systemausgabe gemäß Abschnitt 3.6.3.4 definiert wurden, analog darzustellen. vtSim enthält eine Validierungskomponente, die entsprechend formatierte kommaseparierte Werte aus der Simulation einlesen kann und nach geeigneter Konfiguration derartige Darstellungen zur Validierung generiert.

4 Referenzstudie zum Modellierungsrahmen

Der in Abschnitt 3 erläuterte Modellierungsrahmen soll anhand einer Referenzstudie eingehend auf seine Anwendbarkeit und Vollständigkeit hin untersucht werden. Ziel der Referenzapplikation ist es damit auch, als Orientierungshilfe für zukünftige Studien zu dienen. Im folgenden wird zunächst die IVS-Anwendung *Cooperative Adaptive Cruise Control*, die als Referenzapplikation verwendet wird, erläutert. Anschließend ist der Versuchsaufbau für die Referenzstudie beschrieben. Dabei werden auch Kenngrößen definiert, die zur Modelloptimierung und -validierung herangezogen werden sowie eine Untersuchung der Wirkungen des Systems auf den Verkehr erlauben. Zuletzt ist beschrieben, wie die Auswertung der Szenarien hinsichtlich dieser Kenngrößen und eine entsprechende Interpretation zur Optimierung, Validierung und Wirkungsanalyse des Modells konkret verwendet wird.

4.1 Referenzapplikation

Zur Untersuchung der Anwendbarkeit, Gültigkeit und Effizienz des in Kapitel 3 ausgeführten Rahmenwerks wird in diesem Kapitel eine Referenzapplikation eingeführt, für die ein Systemmodell erstellt wird. Die Spezifikation und Modellierung dieses Systemmodells nutzt die beschriebenen Komponenten und folgt dem Ablauf aus Kapitel 3.

Bei dem hier beschriebenen System handelt es sich um ein kooperatives adaptives Fahrzeugführungssystem, das auf Grundlage der Nutzung von V2X-Kommunikation (siehe Abschnitt 2.1.5) Fahrzeuge zu Pulks zusammenführt und diese Pulks weitgehend automatisch über ein vordefiniertes Straßennetz führt. Es ist eine Weiterentwicklung der bereits in Serienfahrzeugen eingesetzten *Adaptive Cruise Control (ACC)*-Technologie. Ein ACC-Regler nutzt Radarsensoren an der Vorderseite eines Fahrzeugs um den Abstand und die Differenzgeschwindigkeit zum vorausfahrenden Fahrzeug zu messen. Bei Vorgabe eines Wunschabstandes und einer Wunschgeschwindigkeit regelt das System automatisch die Beschleunigung um diesen Wunschabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug einzuhalten. Erkennt das Fahrzeug kein vorausfahrendes Fahrzeug, wird die Beschleunigung so angepasst, dass es seine Wunschgeschwindigkeit erreicht. [MARSDEN ET AL. 2001] liefert eine detaillierte Systembeschreibung und mögliche Wirkungen von ACC-Systemen.

In Bild 4.1 ist ein mit einem ACC-System ausgestattetes Fahrzeug (blaues Fahrzeug, mit E markiert) dargestellt, das ein vorausfahrendes Fahrzeug (orange, mit L markiert) detektiert. Die Weiterentwicklung zum kooperativen ACC besteht in der Berücksichtigung von mehr als nur einem direkt detektierbaren Fahrzeug. Per V2X-Kommunikation können Fahrparameter

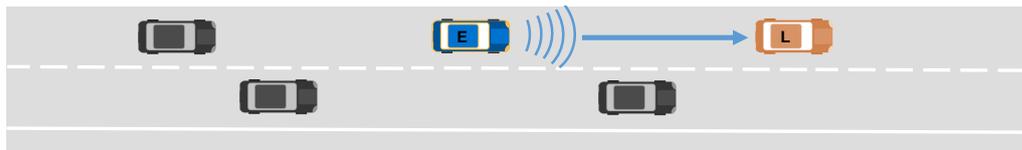


Bild 4.1 Schematische Darstellung eines ACC-Fahrzeugs (blau markiert) und des detektierten, direkt vorausfahrendes Fahrzeugs (orange markiert). Eigene Darstellung.

von mehreren Fahrzeugen im Umfeld erfasst werden. So können kommunizierende Fahrzeuge zu Pulks zusammengefasst und diese Pulks in der Art eines Zuges geführt werden.

Dieses System ist als Anwendung im Bereich des hochautomatisierten Fahrens gemäß Abschnitt 2.1.6 einzuordnen. Die konkrete Implementierung dieser Referenzapplikation orientiert sich an dem von SHLADOVER ET AL. [2009] und BU ET AL. [2010] vorgeschlagenen und getesteten System. Eine in den USA, wo das Konzept entwickelt wurde, geläufige Bezeichnung für ein System dieser Art ist *Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC)*.

LEI ET AL. [2012] führten eine Analyse des CACC-Systems im Rahmen eines gekoppelten Simulationsansatzes entsprechend Abschnitt 2.9.2 mit den Simulatoren SUMO und OMNet++ durch. Sie zeigten einen signifikant positiven Einfluss von Fahrzeugpulks, die mit dem CACC-System geführt werden, auf die Stabilität des Verkehrsablaufs in kleinräumigen Szenarien ohne eingehende Betrachtung des gesamten umliegenden Verkehrs. VAN AREM ET AL. [2006] stellten in einer weiteren Simulationsstudie fest, dass Verkehrssituationen, in denen nur ein geringer Anteil ($< 40\%$) an Fahrzeugen mit einem CACC-System ausgestattet ist, zu einer Inhomogenität tendieren, die vom heterogenen Fahrverhalten bei Interaktionen menschlicher Fahrer mit CACC-gesteuerten Fahrzeuge herrühren. Verbesserungen im Verkehrsfluss kann das System der Untersuchung zufolge insbesondere im Bereich von Engstellen bewirken. Sie merken an, dass der Einfluss der Qualität der V2X-Nachrichtenübertragung auf den Verkehrsablauf mit dem System zum Zeitpunkt der Untersuchung noch nicht erforscht wurde. Eine weitere, im Folgenden nicht weiter betrachtete Variante des CACC-Systems wurde von GUVENC ET AL. [2012] implementiert und erfolgreich getestet.

Eine Wirkungsanalyse im Hinblick auf den Einfluss der Qualität der V2X-Nachrichtenübertragung auf die Wirkungen des CACC-Systems im Verkehr wurde von BAUR ET AL. [2014] vorgestellt. Diese Studie stellt eine Vorabveröffentlichung von Teilen der im Folgenden dargestellten Analyse dar.

4.2 Modellspezifikation für das Referenzsystem

Auf Grundlage des Modellierungsrahmens aus Kapitel 3 wurde ein optimiertes Systemmodell zur Verkehrssimulation der CACC-Funktionalität spezifiziert. Das entsprechende Vorgehen wird im Folgenden erläutert.

4.2.1 Textuelle Beschreibung der Funktionalität

Dieser Abschnitt enthält die in Abschnitt 3.6.1 vorgeschlagene rein textuelle Beschreibung des Referenzsystems. Es soll dem umfassenden grundlegenden Verständnis der Funktionsweise sowie der späteren gezielten Ableitung formal-technischer Beschreibungen dienen:

Übergeordnetes Ziel des CACC-Systems ist es, möglichst viele Fahrzeuge, die damit ausgestattet sind, zu einer möglichst geringen Zahl von möglichst langen Fahrzeugpulk zusammenzuführen. Es handelt sich um eine Applikation im Fahrzeug, die aktive Eingriffe in die Fahrzeugaktuatorik und damit in das operative Fahrverhalten des Fahrzeugs vornimmt. Aus Sicht der Systemmodellierung sind für das System daher zur Verkehrsbeeinflussung gemäß Abschnitt 2.1.7 die Größen *Fahrzeugbeschleunigung* und *Wunschfahrstreifen* relevant.

Die zugrunde liegenden Umfeldinformationen, die zusätzlich zu den Fahrdynamikaufzeichnungen, des eigenen, im Folgenden *Ego*-Fahrzeug bezeichneten Fahrzeugs, erfasst werden, sind folgende:

- **Abstandsmessung zwischen Ego-Fahrzeug und vorausfahrendem Fahrzeug:** In realen Fahrzeugen erfolgt diese auf Basis von Radar- oder Lidarsensoren. Für Simulationsmodelle besteht die Annahme, dass die Informationen unmittelbar zur Verfügung stehen auf Grundlage des euklidischen Abstands zwischen den geographischen Koordinaten der beiden Folgefahrzeuge.
- **Inhalte ausgesendeter V2X-Basisnachrichten**, die Informationen über die Positionen und Bewegungen von Fahrzeugen in der Umgebung liefern, die diese Nachrichten aussenden. Außerdem enthalten die CACC-Nachrichten die Information, ob das sendende Fahrzeug bereits einem CACC-Pulk angehört.
- **Erkennung des Fahrstreifens**, auf dem sich das Fahrzeug momentan befindet. In realen Fahrzeugsystemen kann dies durch hochgenaue Ortung erfolgen. In der Verkehrssimulation liegt diese Information für jedes Fahrzeug direkt vor.

Zentrale parametrierbare Zielgröße des CACC-Systems ist die *CACC-Zielzeitlücke* zum jeweils vorausfahrenden Fahrzeug, die alle Fahrzeuge im Pulk zur Harmonisierung des Verkehrs einheitlich einhalten sollen. Sie liegt in den genannten Studien für CACC-Fahrzeuge bei 0,6 s bis 1,0 s. Außerdem muss zusätzlich ein weiterer Zielabstand eingestellt werden für ausgestattete Fahrzeuge, die keinem CACC-Pulk angehören und nach der herkömmlichen ACC-Regelstrategie fahren. Die *ACC-Zielzeitlücke* muss größer sein als die CACC-Zeitlücke. Sie liegt üblicherweise in einem Bereich von 1,2 s bis 2,0 s.

Auf Basis dieser Informationen sind folgende Strategien vorgesehen, um das Ziel der Pulkbildung zu erreichen. Sie referenzieren auf Bild 4.2, das verschiedene Situationen im Ablauf der CACC-Funktionalität illustriert.

- Ist ein CACC-ausgestattetes Fahrzeug noch nicht Mitglied eines Pulks, prüft es durch einen Vergleich der Abstandsmessung mit den gegebenenfalls empfangenen V2X-Nachrichten, die vom vorausfahrenden Fahrzeug ausgesendet wurden, ob dieses Vorderfahrzeug ebenfalls ein CACC-Fahrzeug ist und einem CACC-Pulk angehört.
- Ist dies der Fall, schließt es sich dem Pulk an und das eigene CACC-System regelt die Fahrzeugbeschleunigung oder -verzögerung so, dass der Zielabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug im Pulk erreicht wird (orange Fahrzeuge).
- Ist das vorausfahrende Fahrzeug kein CACC-Fahrzeug, wertet es die Umgebungstabelle (siehe Abschnitt 3.3.1.5) und die enthaltenden V2X-Nachrichten dahingehend aus, ob auf einem der Nachbarfahrstreifen ein aktiver CACC-Pulk besteht. Ist dies der Fall, wird der Wunschfahrstreifen des Ego-Fahrzeugs auf diesen Nachbarfahrstreifen gesetzt, so dass das Simulationsmodell einen Fahrstreifenwechsel dorthin vornimmt, sobald dort die dafür notwendige Zeitlücke erkannt wird (blaues Fahrzeug).
- Wird weder vor dem Ego-Fahrzeug auf dem eigenen noch auf einem Nachbarfahrstreifen ein bestehender Pulk erkannt, wertet das CACC-System die V2X-Nachrichten von nachfolgenden Fahrzeugen und die entsprechenden Abstandswerte aus und prüft, ob mindestens zwei CACC-aktivierte Fahrzeuge auf dem selben Fahrstreifen direkt nachfolgen. Ist dies der Fall, ist das Ego-Fahrzeug ein neues Pulk-Führungsfahrzeug und es bildet mit den beiden (oder mehr) Nachfolgern einen neuen Fahrzeugpulk (rotes Fahrzeug).
- Werden weder aktive Fahrzeugpulks noch mindestens zwei nachfolgende CACC-Fahrzeuge erkannt, kann das Fahrzeug sich keinem Pulk anschließen und keinen neuen CACC-Pulk generieren. In diesem Fall entspricht die Regelstrategie des Fahrzeugs einer herkömmlichen ACC-Regelung. Das heißt, das CACC-System regelt die Fahrzeugbeschleunigung im Hinblick auf die ACC-Zeitlücke (grünes Fahrzeug).

4.2.2 Technische Architektur des Referenzsystems

Die Implementierung der Referenzapplikation soll vollständig eingebettet sein in die Rahmenarchitektur aus Abschnitt 3.3. Dazu werden die dafür vorgesehenen modularen und generischen Komponenten wiederverwendet und entsprechende Schnittstellen implementiert.

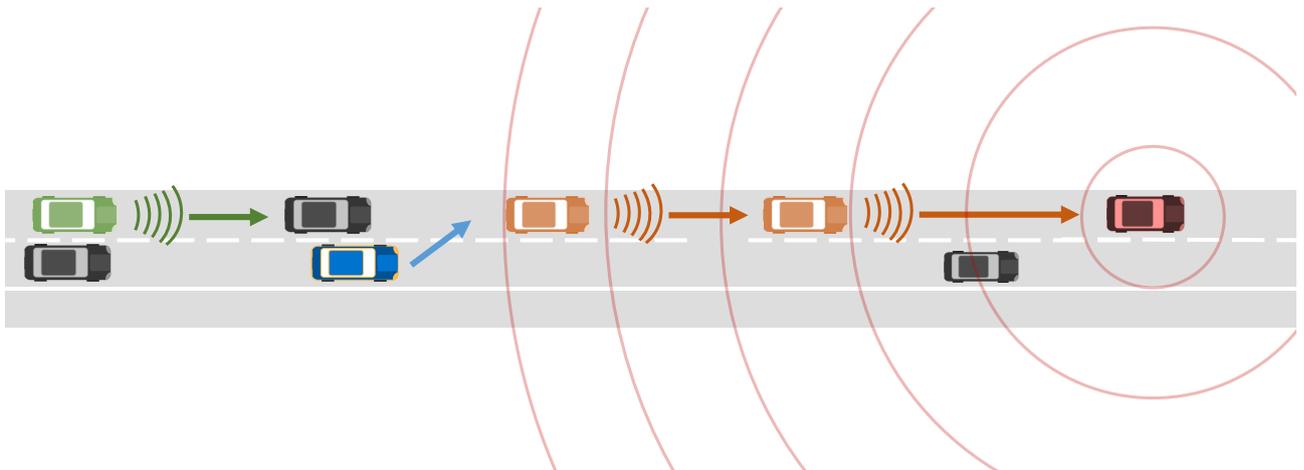


Bild 4.2 Illustration der Pulkbildung durch das CACC-System und die entsprechenden Systemzustände. Eigene Darstellung.

4.2.2.1 Verwendete Komponenten aus der Rahmenarchitektur

Von den in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen Komponenten und Klassen werden zur Implementierung der Referenzapplikation die folgenden genutzt:

- Applikationsausführung und Datenbereitstellung,
- Datenobjekt für Fahrzeuginformationen,
- Zusammenhangsliste,
- Zustandsbasierte Fahrzeugbeeinflussung,
- Konfigurierbare Modellkomponente für die V2X-Nachrichtenübertragung.

Das letztere Modul, die Konfiguration der V2X-Nachrichtenübertragung, wurde in beiden Varianten genutzt, die in Abschnitt 3.3.1.10 vorgeschlagen wurden:

- Für die Parametersensitivitätsanalysen wurde eine hypothetische ideale Kommunikation mit parametrierbarer Reichweite genutzt (100 m bis 1000 m, siehe Abschnitt 4.5)
- Außerdem wurden einzelne ausgewählte Szenarien unter Nutzung des VCOM-Moduls definiert, bei denen die Wahrscheinlichkeit für den Nachrichtenempfang entsprechend der Wahrscheinlichkeitsfunktion aus Abschnitt 2.5.3 mit größerer Entfernung zwischen Sender und Empfänger absinkt.

4.2.2.2 Struktur des Applikationsmodells

Die Architektur der applikationsspezifischen Klassen, die für das CACC-Modell implementiert wurden und die in die Rahmenarchitektur aus Abschnitt 3.3 eingebettet sind, ist in Bild 4.3 dargestellt.

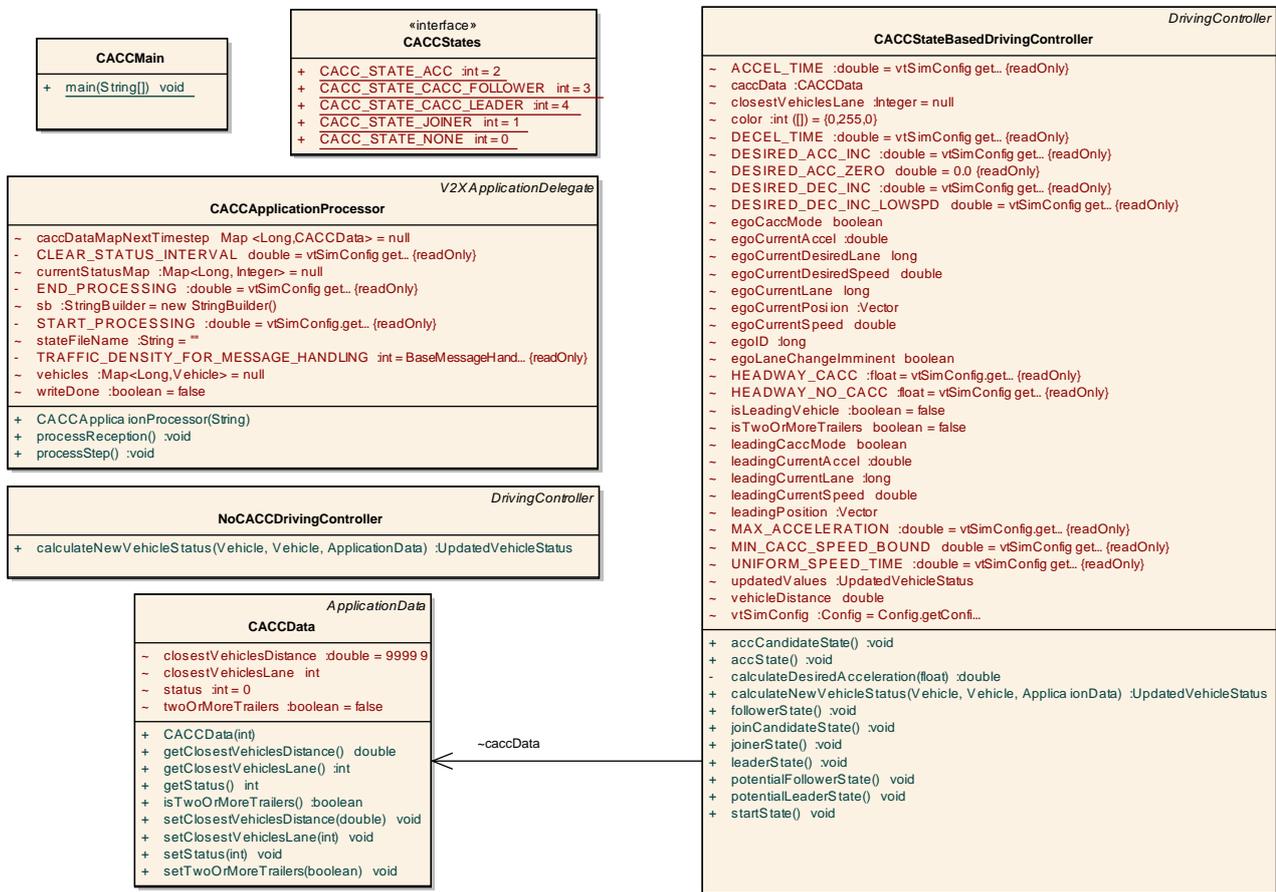


Bild 4.3 UML-Klassenmodell der CACC-Applikation. Eigene Darstellung.

4.2.3 Erwartete Wirkungen auf den Gesamtverkehr

Das CACC-System zielt darauf ab, das Führen eines Fahrzeugs sicherer, effizienter und komfortabler zu machen. Somit soll, insbesondere aus Sicht der Automobilhersteller und Systemanbieter, der Erwerb eines Fahrzeugs, das mit einem CACC-System ausgestattet ist, einen individuellen Mehrwert für den Kunden bringen.

Darüber hinaus ist jedoch auch ein großräumiger volkswirtschaftlicher Nutzen eines solchen Systems zu erwarten, sofern es in einer ausreichend großen Anzahl von Fahrzeugen im Straßenverkehr zum Einsatz kommt.

4.2.3.1 Erwartete Wirkungen auf die Verkehrssicherheit

Die Spezifikation der CACC-Funktionalität lässt positive Wirkungen auf den Gesamtverkehr hinsichtlich der Wirkdimension *Verkehrssicherheit* erwarten. Eine wichtige Rolle spielen bei dieser Annahme die beiden folgenden Aspekte:

- Harmonisierung des Verkehrs durch Vereinheitlichung der Fahrzeugabstände und dadurch mutmaßlich weniger kritische Auffahrsituationen.
- Signifikante Reduktion der Reaktionszeit durch aktive Regelung der Fahrzeugbeschleunigung.

Als Sensitivitätsmaß für die Quantifizierung eines möglichen Einflusses auf die Verkehrssicherheit soll in der späteren Analyse die *Häufigkeit kritischer Situationen* dienen. Zu diesem Zweck erfolgt die Definition einer kritischen Situation auf Basis der Arbeiten von PARK ET AL. [2011]. Sie nutzten aufgezeichnete Informationen von realen Fahrzeugunfällen und leiteten typische Größen für Sicherheitsindikatoren ab, die häufig als Schwelle zum Auslösen eines Unfalls erkannt wurden. Sie stellten für die inverse Zeit bis zur Kollision (Der inverse Wert der TTC, siehe Abschnitt 2.6.4.3) einen kritischen Schwellwert von 0,4 s fest, was einer TTC von 2,5 s entspricht. Zusätzlich identifizieren sie die Differenz der Verzögerungsrate (deceleration rate difference, DRD) der beiden Folgefahrzeuge als relevante Größe zur Vermeidung von Fehllarmen.

$$DRD = a_e - a_l \quad (4.1)$$

Wenn trotz einer niedrigen TTC das vorausfahrende Fahrzeug bereits wieder beschleunigt, während das nachfolgende Fahrzeug schon bremst, ist die Kritikalität bereits wesentlich geringer als es eine niedrige TTC indizieren würde. Den Grenzwert der DRD legen sie mit $15 \frac{ft}{s^2} = 4,57 \frac{m}{s^2}$ fest.

Im Rahmen dieser Arbeit werden diese Kriterien etwas weiter gefasst, um die Stichprobengröße potentiell kritischer Situationen und damit die Aussagekraft der statistischen Analysen zu erhöhen. Die Einordnung der Fahrsituationen als kritische Situationen bleibt damit erhalten, das Maß der Kritikalität wird damit abgesenkt. Es ermöglicht in der vergleichenden Betrachtung verschiedener Szenarien mit den gleichen Maßen jedoch weiterhin gültige und statistisch starke Aussagen zur Erhöhung oder Verringerung der Verkehrssicherheit.

Zum Vergleich verschiedener Simulationsszenarien hinsichtlich der Häufigkeit kritischer Situationen werden im Rahmen dieser Arbeit Anteilswerte verwendet. Das bedeutet, dass die Anzahl der gemäß der obigen Definition ermittelten kritischen Situationen über alle zu vergleichenden Szenarien aufsummiert wird. Anschließend werden die prozentualen

Anteile jedes Häufigkeitswertes für die jeweiligen Szenarien an dieser Gesamtsumme gegenübergestellt.

Der Grenzwert für kritische TTC-Werte wird auf 3,5 s festgelegt, die Differenz der Verzögerungsrate auf $0 \frac{m}{s^2}$.

4.2.3.2 Erwartete Wirkungen auf die Verkehrseffizienz

Die im Zusammenhang mit der Verkehrssicherheit genannte Harmonisierung des Verkehrsablaufs und die damit erhoffte Kapazitätserhöhung des betreffenden Streckenabschnitts lässt auch eine Verbesserung der Verkehrseffizienz erwarten. In diesem Zusammenhang ist insbesondere der Aspekt der Pulkstabilität zu erwähnen, der für das CACC-System von PLOEG ET AL. [2011] eingehend untersucht wurde.

Mögliche Wirkungen auf die Verkehrseffizienz werden zum einen mit der Kenngröße *Mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit* beschrieben. Zum anderen stellt eine Veränderung in der Verteilung der Zeitlücken (siehe Abschnitt 2.6.4.2) im Verkehrsablauf einen Indikator für einen Einfluss auf die Streckenkapazität dar. TREIBER UND KESTING [2010] erläutern diesen Zusammenhang im Detail. Vereinfacht beschrieben führen im dichten, nicht gestauten Verkehr kleinere mittlere Zeitlücken zu einer Erhöhung der Streckenkapazität. Dieser Umstand wird in der Sensitivitätsanalyse im Rahmen dieser Studie zur Beurteilung von Verkehrseffizienzeffekten genutzt.

4.2.3.3 Abgrenzung der nicht untersuchten Ziele

Die Betrachtung der CACC-Anwendung in dieser Arbeit konzentriert sich auf großräumige Wirkungen im Verkehr. Andere angestrebte Wirkungen des Systems, wie etwa die Erhöhung des Fahrkomforts für den Fahrer eines CACC-Fahrzeugs oder Risiken der Systemnutzung im Fehlerfall sind nicht Gegenstand der makroskopischen Verkehrsbetrachtung.

4.2.4 Zustandsmodellierung des Referenzsystems

Die Beschreibung eines zustandsbasierten Ablaufs wurde in Abschnitt 3.6.5 als zentrales Element der Modellierung identifiziert. Am Beispiel des CACC-Systems wird das konkrete Vorgehen in diesem Abschnitt erläutert.

4.2.4.1 Identifikation und Beschreibung der Systemzustände

Zur technischen Spezifikation des Systems werden die Systemzustände identifiziert. Am Ende eines Simulationszeitschritts kann jedes CACC-Fahrzeug in einem von genau fünf Ausgangszuständen sein:

1. **None:** Keine der Auslösebedingungen ist erfüllt. Das Fahrzeug fährt mit deaktiviertem System, der Fahrer hat die volle Kontrolle über sein Fahrzeug. Dieser Zustand tritt im ersten Zeitschritt vor der Berechnung einer Fahrautomatisierung und in dem Fall, dass kein anderes Fahrzeug in relevantem Abstand vorausfährt oder nachfolgt sowie im Fehlerfall auf.
2. **Leader:** Das Fahrzeug erkennt, dass kein anderes ausgestattetes Fahrzeug vorausfährt. Außerdem wird ihm per V2X-Nachrichten mitgeteilt, dass mindestens zwei ausgestattete Fahrzeuge direkt hinter ihm fahren, also ein Pulk ausgestatteter Fahrzeuge von mindestens drei Fahrzeugen entstehen kann. Das Fahrzeug führt dann automatisch diesen Pulk an.
3. **Follower:** Es besteht ein Pulk aus drei oder mehr Fahrzeugen auf dem befahrenen Fahrstreifen und das Fahrzeug ist Teil davon, jedoch nicht das Führungsfahrzeug. In diesem Fall adaptiert das Fahrzeug sein längsdynamisches Fahrverhalten entsprechend der Vorgaben des Pulk-Anführers.
4. **Joiner:** Es gibt keinen Pulk aus drei oder mehr ausgestatteten Fahrzeugen auf dem befahrenen Fahrstreifen, per V2X-Kommunikation wird aber ein bestehender Pulk auf dem Nachbarfahrstreifen gemeldet. Das Fahrzeug versucht dann, zum nächstmöglichen Zeitpunkt auf diesen Nachbarfahrstreifen zu wechseln und führt diesen Fahrstreifenwechsel gegebenenfalls autonom durch.
5. **ACC-Modus:** Es fahren weder mindestens zwei ausgestattete Fahrzeuge voraus, noch folgen mindestens zwei ausgestattete Fahrzeuge. Zudem wird von keinem Nachbarfahrstreifen ein CACC-Pulk gemeldet. Das Fahrzeug hält seinen Abstand zum Vorderfahrzeug in diesem Fall nur auf Basis der Informationen, die der virtuelle Radarsensor liefert. Es erfolgt keine Pulkbildung. Dieses Verhalten entspricht exakt der Funktionsweise eines klassischen ACC-Systems.

Das Prinzip der Pulkbildung durch das CACC-System und die beschriebenen Zustände sind in Bild 4.4 illustriert. Die beiden schwarz eingezeichneten Fahrzeuge stellen dabei Fahrzeuge dar, die nicht mit einem CACC-System ausgestattet sind und daher nicht beeinflusst werden können.

4.2.4.2 Ableitung eines Zustandsautomaten

Die im vorangehenden Abschnitt textuell beschriebenen Charakteristiken und Zustandsübergänge werden anschließend in einen formellen Zustandsautomaten überführt. Der resultierende Automat ist in Bild 4.5 dargestellt.

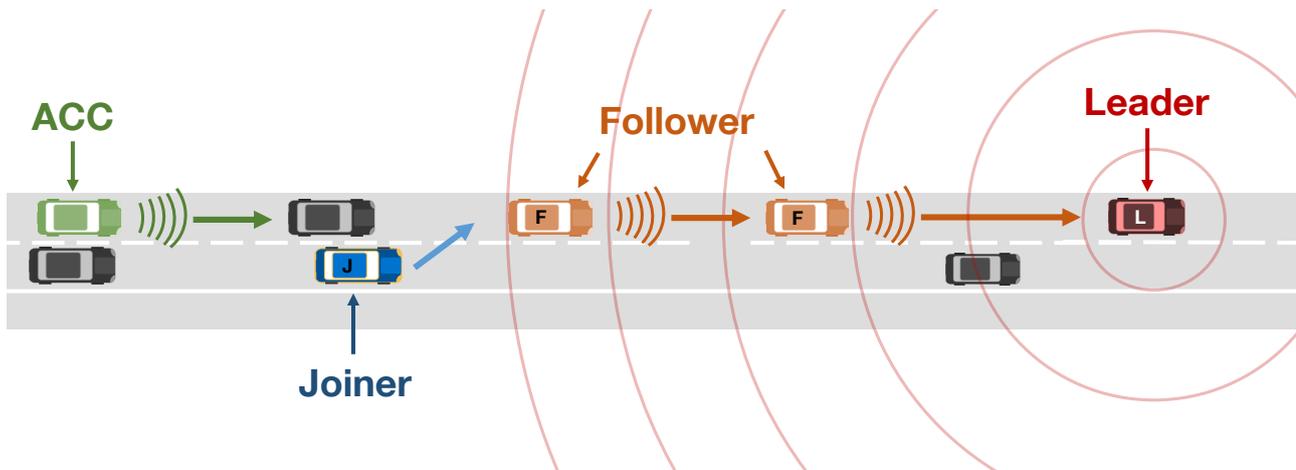


Bild 4.4 Illustration der Plukbildung durch das CACC-System und die entsprechenden Systemzustände. Eigene Darstellung.

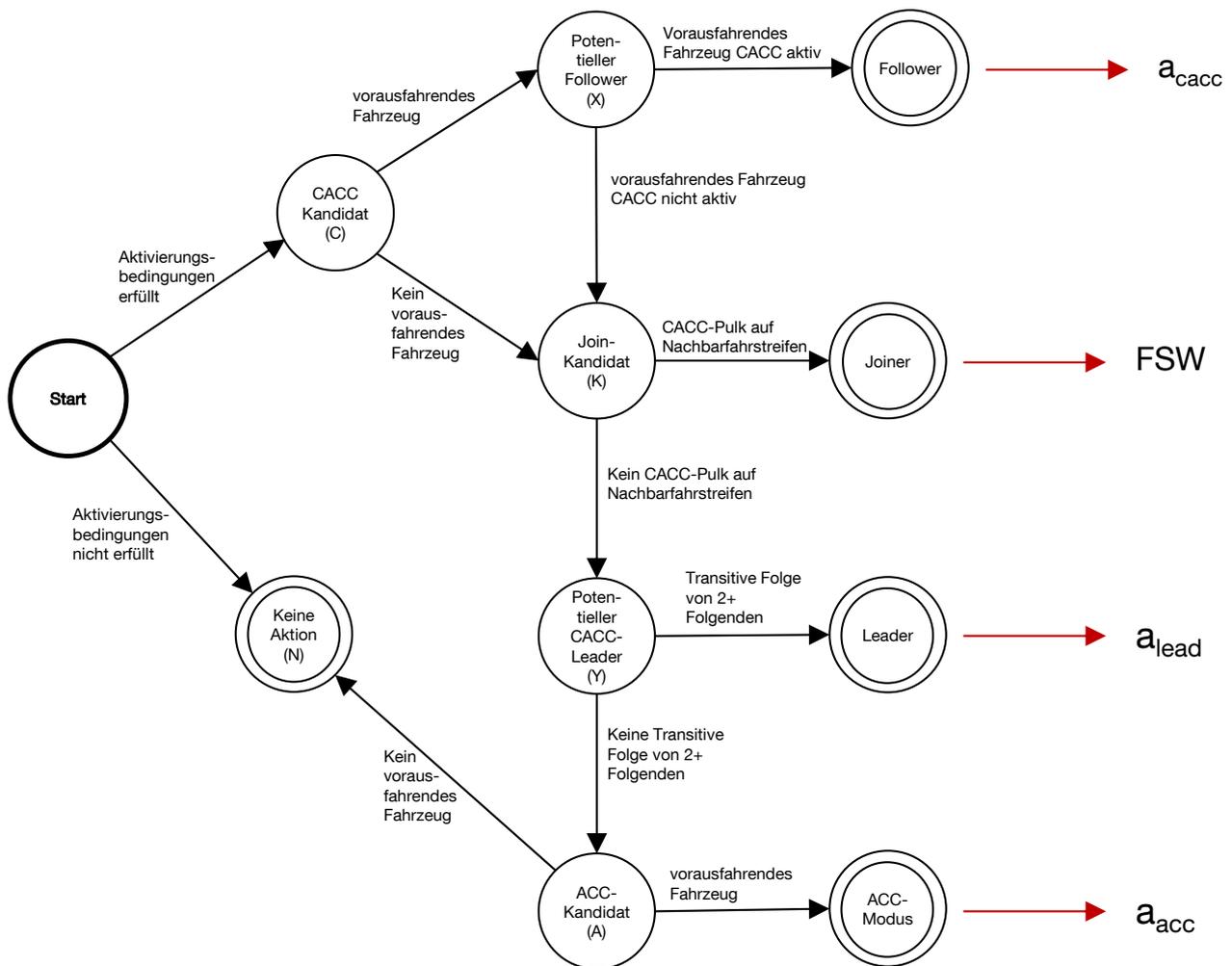


Bild 4.5 Zustandsautomat für das CACC-Systemmodell. Eigene Darstellung.

Die Zustandsübergänge hängen von den jeweils aktuellen Werten der Eingangsparameter des Systems ab. Diese ergeben sich aus den aktuellen Fahrparametern sowie den Umfeldinformationen des entsprechenden Fahrzeugs.

4.2.5 Eingangsgrößen

Das Systemverhalten wird bestimmt durch eine Menge von Faktoren, die mittels Eingangsvariablen beschrieben werden. Entsprechend Abschnitt 3.6.3.3 kann dabei nach Umgebungsvariablen und Stellgrößen des Systems unterschieden werden.

4.2.5.1 Umgebungsvariablen des Systems

Bei den Umgebungsvariablen handelt es sich um Größen, die nicht durch das modellierte Verkehrssystem selbst bestimmt sind, sondern durch Gegebenheiten des Fahrzeugs selbst oder der Umwelt definiert sind. Im Fall des CACC-Systems sind dabei folgende Variablen relevant:

d_c = aktueller (gemessener) Abstand zwischen Ego-Fahrzeug und dem direkt vorausfahrenden Fahrzeug

v_e = aktuelle Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs

a_l = Beschleunigung des vorausfahrenden Fahrzeugs

v_l = Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs

4.2.5.2 Stellgrößen des Systems

Stellgrößen sind Parameter, die nur das modellierte System betreffen und dessen Verhalten direkt beeinflussen. In Tabelle 4.1 sind die Stellgrößen des CACC-Systems näher erläutert.

Name des Parameters	Variable	Erläuterung
Zielzeitlücke CACC	tht_c	Zeitlücke zum Vorderfahrzeug, die das Ego-Fahrzeug im CACC-Follower-Status einhalten soll. Dies ist die zentrale Regelgröße der Steuerung.
Zielzeitlücke ACC	tht_a	Zeitlücke zum Vorderfahrzeug, die das Ego-Fahrzeug im ACC-Status einhalten soll.
Kommunikationsreichweite	r	Annahme für die räumliche Ausdehnung des Bereichs, in dem ausgesendete Nachrichtenpakete bei empfangenden Fahrzeugen ankommen. Nur relevant bei angenommener idealer Kommunikation innerhalb des Bereichs. Nicht relevant bei Verwendung des VCOM-Modells (siehe Abschnitt 2.5.3).
Minimalgeschwindigkeit	v_{min}	Untere Grenze der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs, ab der eine Berechnung der CACC-Regelgrößen vorgenommen wird.
Maximale Beschleunigung CACC	a_{max}	Maximaler Wert, mit dem ein CACC-Leader-Fahrzeug beschleunigen soll, um seine Wunschgeschwindigkeit zu erreichen. Dieser Vorgang kann an das Fahrverhaltensmodell der Simulation delegiert werden. Dann ist dieser Parameter wirkungslos.
Beschleunigung CACC - Aufschließen	a_{dd}	Inkrementelle Erhöhung der Zielbeschleunigung, um zu einem bestehenden CACC-Pulk aufzuschließen.
Verzögerung Sicherheitsabstand	d_{sd}	Inkrementelle Erhöhung der Zielverzögerung, um den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug bei Bedarf zu vergrößern.
Wunschverzögerung Langsamfahrt	a_{ddslow}	Inkrementelle Erhöhung der Zielverzögerung bei geringer Geschwindigkeit.
Beschleunigungszeit	t_a	Zeit, innerhalb derer das Fahrzeug zum Vorderfahrzeug aufgeschlossen und den Zielabstand erreicht haben soll.
Verzögerungszeit	t_d	Zeit, innerhalb derer das Fahrzeug den Abstand zum Vorderfahrzeug vergrößert und den Zielabstand erreicht haben soll.

Tabelle 4.1 Aufstellung aller Systemparameter des CACC-Systems.

Tabelle 4.2 listet alle Parameter mit der jeweils im Rahmen der Sensitivitätsanalyse untersuchten Parameterstichprobe auf. Fett gedruckt ist der jeweilige Standardwert, der festgehalten wird, wenn aktuell ein anderer Parameter variiert wird.

Name des Parameters	Einheit	Parameterstichprobe
Zielzeitlücke CACC	s	0,5; 0,6 ; 0,8; 1,0; 1,2
Zielzeitlücke ACC	s	1,2 ; 1,4; 1,5; 1,8; 2,0
Kommunikationsreichweite	m	100; 300; 700 ; 1000
Minimalgeschwindigkeit	m/s	15,0; 19,44 ; 23,0; 27,0
Maximale Beschleunigung CACC	m/s^2	0,0; 0,3 ; 0,5; 1,0; 2,0
Beschleunigung CACC - Aufschließen	m/s^2	0,2; 0,7 ; 1,0; 1,5
Verzögerung Sicherheitsabstand	m/s^2	-5,0; -3,88 ; -2,0; -1,0
Wunschverzögerung Langsamfahrt	m/s^2	-7,0; -5,88 ; -3,0; -2,0
Beschleunigungszeit	s	2,0; 3,0 ; 4,0; 5,0; 7,0
Verzögerungszeit	s	2,0; 3,0 ; 4,0; 5,0; 7,0

Tabelle 4.2 Aufstellung aller Systemparameter des CACC-Systems mit den für die Analysen genutzten Wertebelegungen.

4.2.6 Ausgangsparameter des Systems

Die Ausgangsparameter der virtuell ausgestatteten Fahrzeuge, die durch das CACC-Regelsystem beeinflusst werden, beschränken sich auf die operative und taktische Ebene (siehe Abschnitt 2.1.7), es werden also die Längsbeschleunigung oder der Fahrstreifenwechselwunsch durch die Systemausgabe bestimmt. Je nach aktuellem, wie in Abschnitt 4.2.4.1 beschriebenen Ausgangszustand, werden die Ausgabeparameter gemäß Tabelle 4.3 geregelt.

Zustand	Beeinflussungsebene	Ausgabeparameter
None	keine	-
Leader	Längsbeschleunigung	a_l
Follower	Längsbeschleunigung	a_f
Joiner	Fahrstreifenwechselwunsch	lcd_j
ACC	Längsbeschleunigung	a_a

Tabelle 4.3 Beeinflusste Parameter in Abhängigkeit vom aktuellen Ausgangszustand des Systems.

4.2.7 Regelstrategie

Die Regelung wurde entwickelt im PATH-Programm der University of California in Berkeley, USA, basierend auf den Arbeiten von BU ET AL. [2010] und wurde im Rahmen der Referenzstudie minimal überarbeitet. Die Überarbeitung betrifft die Hysterese des Zielabstandes und ist in Abschnitt 4.2.7.2 näher erläutert. Die Berechnung der jeweils relevanten Ausgangsgröße hängt vom aktuellen Endzustand des Systems ab. Regelgrößen, die im jeweiligen Zustand nicht aufgeführt sind, werden nicht durch das System, sondern nur durch Verhaltensmodelle in der Verkehrssimulation beeinflusst.

4.2.7.1 Zustand Leader

Im Zustand *Leader* fährt das Fahrzeug ohne Beeinflussung mit seiner Wunschgeschwindigkeit. Die Regelung hat in diesem Fall nur sicherzustellen, dass kein Fahrstreifenwechsel erfolgt, der nicht durch die Verkehrs- oder Routenwahlsituation notwendig ist.

4.2.7.2 Zustand Follower und Zustand ACC

Die Regelgröße ist in diesem Fall die Beschleunigung des Folgefahrzeugs a_f . Sie wird folgendermaßen ermittelt:

Es wird ein projizierter Abstand berechnet, der indiziert, ob mit den aktuell gefahrenen Beschleunigungs- und Geschwindigkeitswerten des Ego- und des vorausfahrenden Fahrzeugs (v_e und v_l sowie a_e und a_l) der Zielabstand (tht_c im Zustand *CACC*, tht_a im Zustand *ACC*) in definierter Beschleunigungszeit t_a erreicht werden kann.

Wird dieser Abstand voraussichtlich überschritten, wird die Regelgröße Fahrzeugbeschleunigung auf den parametrisierten Beschleunigungswert a_{dd} gesetzt. Dabei wurde in dieser Arbeit ein Hysteresefaktor von 0,1 m eingeführt, um Instabilitäten bei der Pulkbildung zu verringern.

$$a_f = \begin{cases} 0, & \text{wenn } h_p = tht_c \pm 0,1m \text{ (CACC) bzw. } h_p = tht_a \pm 0,1m \text{ (ACC),} \\ a_{dd}, & \text{wenn } h_p > tht_c + 0,1m \text{ (CACC) bzw. } h_p > tht_a + 0,1m \text{ (ACC),} \\ a_{dec}, & \text{sonst.} \end{cases} \quad (4.2)$$

$$a_{dec} = \begin{cases} a_{ds}, & \text{wenn } v_{ego} \geq v_{min}, \\ a_{dsslow}, & \text{sonst.} \end{cases} \quad (4.3)$$

Dabei erfolgt die Berechnung der projizierten Fahrzeugabstandsprognose nach folgenden Berechnungsvorschriften:

$$d_p = d_c - d_{pe} + d_{pl} \quad (4.4)$$

$$d_{pe} = 0.5 * a_{da} * t_a^2 + v_l * t_a \quad (4.5)$$

$$d_{pl} = 0.5 * a_l * t_a^2 + v_l * t_a \quad (4.6)$$

$$h_p = \frac{d_p}{(a_{da} * t_a + v_e)} \quad (4.7)$$

mit

d_p = projizierter Abstand zwischen dem Ego-Fahrzeug und seinem vorausfahrenden Fahrzeug

d_{pe} = projizierter Abstand unter Berücksichtigung der Beschleunigung des Ego-Fahrzeugs

d_{pl} = projizierter Abstand unter Berücksichtigung der Beschleunigung des vorausfahrenden Fahrzeugs

h_p = projizierter Zeitabstand

Die Zustände *Follower* und *ACC* unterscheiden sich hinsichtlich der Regelstrategie nur in der Belegung der Zielzeitlücke th_t , wobei der Wert im *ACC*-Zustand grundsätzlich größer sein muss als im *Follower*-Zustand.

4.2.7.3 Zustand Joiner

Die Regelgröße ist in diesem Fall der Zielfahrstreifen ln_c , auf dem sich der nächstgelegene *CACC*-Pulk befindet.

4.3 Nicht-funktionale Anforderungen

Neben der Definition der Funktionalität des *CACC*-Applikationsmodells sind Qualitätskriterien zu berücksichtigen, die später eine reibungslose und effiziente Simulation dieser Nachbildung ermöglichen.

4.3.1 Anforderungen an Laufzeit und Speicherbedarf

Entsprechend der in Abschnitt 3.6.4 erläuterten Überlegungen sind auch für das CACC-System bestimmte Randbedingungen hinsichtlich der Simulationslaufzeit und des Speicherbedarfs zu berücksichtigen: Die Anzahl der durch die modellierte Applikation zu beeinflussenden Fahrzeuge steigt in der asymptotischen Betrachtung linear mit der Anzahl der Fahrzeuge im Netzwerk. Folgende Objekte sind ausschlaggebend für den Speicherbedarf bei der Simulation des CACC-Systems:

- Fahrzeuge
- CACC-Systemstatusinformationen
- Fahrzeugstatusinformationen

Eine zuverlässige Ermittlung des Speicherbedarfs ist nicht realistisch, da der Einfluss der Simulationsanwendung erfahrungsgemäß groß ist. Entscheidend ist der Hinweis aus Abschnitt 3.6.4.2, dass das konsequente Leeren der Datenstrukturen unerlässlich ist, da sonst bei einer großen Anzahl von Fahrzeugen mit dem CACC-System sehr schnell Speicherlecks entstehen.

4.3.2 Anforderungen an die Genauigkeit

Entsprechend Abschnitt 3.6.6 sind Überlegungen über die benötigte Genauigkeit der Modellierung anzustellen. Diese betrifft die nachfolgenden Aspekte:

4.3.2.1 Einordnung in die Beeinflussungsskala

In der Beeinflussungsskala entsprechend Abschnitt 3.6.6.1 ist die CACC-Anwendung im Bereich der *aktiven Einzelfahrzeugbeeinflussung* einzuordnen. Daraus ergeben sich die nachfolgend ausgeführten Anforderungen an die zeitliche Auflösung der Systemausführung.

4.3.2.2 Zeitliche Auflösung

Die zeitliche Auflösung, die für die Modellierung gewählt wurde, also die Frequenz der zentralen Berechnungen orientiert sich an der gewählten Modellskala entsprechend Tabelle 3.9 aus Abschnitt 3.6.6.1. Eine Berechnungsfrequenz von 10 Hz ist in diesem Fall unerlässlich. Dies ergibt sich bereits direkt in der zentralen Stellgröße, der angestrebten Zeitlücke. Diese ist im Standardfall belegt mit dem Wert 0,6 s. Wenn, z.B. einer kurzzeitigen Behinderung im Verkehrsablauf, ein CACC-Pulk recht langsam fährt, das Führungsfahrzeug danach jedoch direkt schnell beschleunigt, werden innerhalb kurzer Zeit Distanzen zurückgelegt, die für die Neuberechnung der Beschleunigung relevant sind.

4.4 Sensitivitätsanalysen zur Modelloptimierung des Referenzsystems

Entsprechend der in Abschnitt 3.7.3 definierten Vorgaben wurde für das Referenzsystem eine umfassende Sensitivitätsanalyse zur Modelloptimierung, -validierung und zur Analyse der Wirkung der Referenzapplikation auf Verkehrseffizienz und -sicherheit durchgeführt. Die Sensitivitätsanalyse besteht hier aus zwei Untersuchungsstudien, deren Ziele in Tabelle 4.4 aufgeführt sind. Diese vier Ziele entsprechen denjenigen, die im Modellierungsrahmen in Abschnitt 3.7.1 als mögliche Ergebnisse derartiger Sensitivitätsanalysen identifiziert wurden.

Ziel der Analyse	Beschreibung	Untersuchungsstudie
Modelloptimierung	Erkennung und ggf. Eliminierung nicht sensitiver Parameter oder Zustände.	
Systemoptimierung	Identifikation optimaler Werte(bereiche) für Systemparameter.	Parametersensitivitätsanalyse
Modellvalidierung	Identifikation von Korrelationen zwischen Ein- und Ausgabeparametern gemäß Spezifikation.	
Wirkungsanalyse im Verkehr	Interpretation der Varianzen zwischen den Szenarienergebnissen hinsichtlich verkehrsrelevanter Größen. In dieser Referenzstudie wird explizit der Einfluss der Systemmodellnutzung auf die Streckenkapazität (gemessen an den mittleren Zeitlücken der Fahrzeuge) untersucht.	Separate Studie zur Wirkungsanalyse

Tabelle 4.4 Ziele der Sensitivitätsanalysen und die Zuordnung zur jeweils durchgeführten Untersuchungsstudie.

Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben die konkrete Konfiguration des modellierten CACC-Systems und den Aufbau der Szenarien als Basis für die anschließend durchgeführten Sensitivitätsanalysen.

4.4.1 Verwendetes Streckennetz

Zur Durchführung der simulationsbasierten Sensitivitätsanalysen soll das in Abschnitt 3.5.1 beschriebene Referenznetz genutzt werden, da es eindeutige Rückschlüsse der Beeinflussung der Längsdynamik auf die Wirkung des Beispielsystems ermöglicht.

4.4.2 Konfiguration der Szenarien

Die zu simulierenden Szenarien ergeben sich aus der Anzahl der Variationen, die untersucht werden sollen. Dabei werden zwei Arten von Analysen unterschieden: Die Parametersensitivitätsanalysen, die auf die Untersuchung der Sensitivität der Stellgrößen des Systems abzielen und zum anderen die Kapazitätsanalyse, die die Wirkung der Variation verschiedener Randbedingungen im Verkehr betrachtet.

4.4.2.1 Parametersensitivitätsanalysen

Insgesamt ergab sich dabei je ein Szenario für jede der 48 Parameterkonfigurationen aus Tabelle 4.2, folglich **48 Simulationsszenarien**.

Der Anteil der ausgestatteten Fahrzeuge mit dem CACC-System beträgt für die Parametersensitivitätsanalysen 100 %.

4.4.2.2 Kapazitätsanalyse

Zum Zweck der Ermittlung des Einflusses der Systemmodellnutzung auf die mittleren Zeitlücken der Fahrzeuge im Simulationsnetz wurden explizit die in Tabelle 4.5 beschriebenen **sechs Szenarien** simuliert.

4.4.3 Simulationsdauer

Die Simulationen haben eine Dauer von *540 Sekunden* (= 9 Minuten). Davon werden *240 Sekunden* (= 4 Minuten) als Warmlaufzeit zum Befüllen des Simulationsnetzes mit Fahrzeugen angenommen. Das bedeutet, dass die Analysedaten aus der Simulation über *300 Sekunden* (= 5 Minuten) aufgezeichnet werden.

Es ist anzumerken, dass es sich hierbei um Simulationskonfigurationen zur Durchführung der Sensitivitätsanalysen handelt. Für umfassende Analysen von Verkehrswirkungen auch in unterschiedlichen Verkehrssituationen werden in der Regel Simulationszeiträume von 15 Minuten bis zu mehreren Stunden durchgeführt.

4.4.4 Parameter der Simulationsausführung

Die Frequenz der Simulationsausführung beträgt 10 Zeitschritte pro Sekunde. Die Fahrzeuge haben eine mittlere Länge von 4,76 m. Dies ist für die Berechnung des Nettoabstandes zwischen zwei Fahrzeugen relevant.

Szenario	Beschreibung
0 % CACC	Kein Fahrzeug ist mit einem CACC-Systemmodell ausgestattet. Dies ist der Null- oder Basisvergleichsfall.
20 % CACC mit VCOM	20 % aller Fahrzeuge im Simulationsnetz sind mit einem CACC-System ausgestattet und sie kommunizieren untereinander mittels des in Abschnitt 2.5.3 beschriebenen VCOM-Modells.
50 % ACC ohne Nachrichtenübertragung	50 % aller Fahrzeuge im Simulationsnetz sind mit einem CACC-System ausgestattet. Sie kommunizieren jedoch nicht miteinander. Es können sich daher keine CACC-Pulks bilden, die Funktionalität entspricht derer eines ACC-Systems im Verkehr.
50 % CACC mit VCOM	50 % aller Fahrzeuge im Simulationsnetz sind mit einem CACC-System ausgestattet und sie kommunizieren untereinander mittels des VCOM-Modells.
50 % CACC mit idealer Kommunikation	50 % aller Fahrzeuge im Simulationsnetz sind mit einem CACC-System ausgestattet und sie kommunizieren mittels hypothetischer idealer Kommunikation. D. h. alle Fahrzeuge, die sich innerhalb einer festgelegten Entfernung (initialer Wert: 700 m) vom Sender befinden, empfangen alle diese Nachrichten.
100 % CACC mit VCOM	Alle Fahrzeuge im Simulationsnetz sind mit einem CACC-System ausgestattet und sie kommunizieren untereinander mittels des VCOM-Modells.

Tabelle 4.5 Szenarien zur Untersuchung der Wirkungen der Nutzung des CACC-Systems auf den Verkehr unter verschiedenen Randbedingungen.

4.4.5 Ermittlung der benötigten Anzahl an Simulationsläufen

Für jedes der oben genannten $48 + 6 = 54$ Szenarien wurden drei initiale Simulationsläufe durchgeführt und die erreichbare Größe des Konfidenzintervalls entsprechend Abschnitt 3.5.2.1 mit einem Konfidenzniveau von 95% berechnet. Beispielhaft ist dies in Tabelle 4.6 für fünf Szenarien dargestellt, die aus der Variation des Parameters *Zielzeitlücke CACC* (tht_c) entstanden sind.

Szenario	Kenngroße	Initiale Läufe	m	sd	CI_e	Beurteilung Größe CI_e
$tht_c = 0,5$ s	Geschwindigkeit [km/h]	5	146,82	5,04	4,00	ausreichend
	Zeitlücke [s]	5	1,50	0,05	0,04	ausreichend
$tht_c = 0,6$ s	Geschwindigkeit [km/h]	5	150,03	4,20	3,34	ausreichend
	Zeitlücke [s]	5	1,56	0,06	0,05	ausreichend
$tht_c = 0,8$ s	Geschwindigkeit [km/h]	5	145,63	4,06	3,23	ausreichend
	Zeitlücke [s]	5	1,52	0,03	0,03	ausreichend
$tht_c = 1,0$ s	Geschwindigkeit [km/h]	5	143,57	4,57	3,63	ausreichend
	Zeitlücke [s]	5	1,67	0,02	0,02	ausreichend
$tht_c = 1,2$ s	Geschwindigkeit [km/h]	5	139,48	3,77	3,00	ausreichend
	Zeitlücke [s]	5	1,67	0,03	0,03	ausreichend

Tabelle 4.6 Ermittlung der Anzahl der benötigten Simulationsläufe mittels Berechnung des erreichbaren Konfidenzintervalls (CI_e) für die Parametervariation der Zielzeitlücke für CACC-Fahrzeuge (tht_c).

mit

m = Mittelwert der Mittelwerte der fünf initialen Simulationsläufe

sd = Standardabweichung der Mittelwerte der fünf initialen Simulationsläufe

CI_e = erreichbares Konfidenzintervall für die Bestimmung des Mittelwertes.

Zusammenfassend für alle Szenarien ist festzustellen, dass die Varianzen zwischen den Simulationsläufen gering sind und mit jeweils fünf Simulationsläufen für alle 54 Szenarien ein genügend kleines Konfidenzintervall zur Interpretation signifikanter Ergebnisse herstellen. Folglich wurden insgesamt $54 * 5 = 270$ Simulationsläufe durchgeführt.

4.4.6 Aufgezeichnete Daten

Aufgezeichnet werden folgende dynamische Informationen während der Simulation:

- **Fahrzeugtrajektorien:** Da die Simulation mit VISSIM durchgeführt wird, handelt es sich im Rohformat um VISSIM-Fahrzeugprotokolle (Dateiendung *.fzp*).
- **Zustandsprotokoll:** Außerdem wird von Seiten der CACC-Applikation in separaten Status-Dateien (Dateiendung *.sta*) je Simulationslauf noch eine Aufzeichnung des jeweils aktuellen Zustands aller Fahrzeuge aufgezeichnet.

Insgesamt ergaben sich so 54 (Szenarien) * 5 (Simulationsläufe) * 2 (Protokolltypen) = 540 Dateien mit einer Gesamtgröße von ca. 6 GB.

4.4.7 Verwendete statistische Tests

Für alle Analysen wurde das in Abschnitt 3.5.2 beschriebene Statistikmodul verwendet. Um die untersuchten Verteilungen auf die Voraussetzungen zur Durchführung einer ANOVA-Varianzanalyse, Varianzhomogenität und Normalverteilung zu testen, wurde der Levene- bzw. der Kolmogorov-Smirnov-Test verwendet. Da keine der betrachteten Verteilungen Varianzhomogenität aufwies, wurde für alle Alternativenvergleiche der nicht-parametrische Kruskal-Wallis-Test verwendet, um signifikante Unterschiede zwischen zwei oder mehr Szenarienmittelwerten festzustellen. Zur Quantifizierung der tatsächlichen Signifikanzen diente anschließend ein paarweise ausgeführter Wilcoxon-Rangsummentest.

4.5 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Der folgende Abschnitt präsentiert und interpretiert die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zur Modellbildung des Referenzsystems. Die Darstellung der entsprechenden Auswertungen umfasst Ergebnisse im Hinblick auf und aufgeteilt nach allen vier der in Abschnitt 3.7.1 beschriebenen Analysezielen: Modellvalidierung, Systemparameteroptimierung, Modellkomplexitätsreduktion und Wirkungsanalyse im Verkehr.

4.5.1 Validierung mittels Korrelationsanalyse unabhängiger und abhängiger Variablen

Zur Validierung der Beeinflussung durch das entwickelte Systemmodell werden geeignete Ausgaben der Sensitivitätsanalysen ausgewählt, um relevante Zusammenhänge festzustellen zwischen mutmaßlich beeinflussenden Parametern und resultierenden Kenngrößen, auf die tatsächlich eine Wirkung erzeugt wurde. Zentraler Systemparameter für die Beurteilung der Beeinflussung durch das System ist, wie in Abschnitt 4.2.5.2 erläutert, der Parameter *Zielzeitlücke CACC, tht_c* .

Bild 4.6 zeigt die resultierende tatsächliche mittlere Zeitlücke auf dem Streckenabschnitt in Abhängigkeit der eingestellten Zielzeitlücke. Die entsprechenden Ergebnisse der statistischen Auswertung sind in Tabelle 4.7 aufgeführt. Zu erwähnen ist, dass hierbei der Levene-Test auf Varianzhomogenität einen p-Wert von 0,0 ergeben hat. Dies bedeutet, dass keine Varianzhomogenität der Verteilungen angenommen werden konnte. Zum Alternativenvergleich wurde daher der nicht-parametrische Kruskal-Wallis-Test mit anschließender Konkretisierung durch den Wilcoxon-Rangsummentest herangezogen, dessen Ergebnisse in der Signifikanzmatrix in Tabelle 4.7 als p-Werte (p) eingetragen sind. Die Matrix enthält zudem die absolute Differenz der Mittelwerte ($diff$) sowie die Effektstärke ($cd = \text{Cohen's } d$) dieser Differenz. Außerdem ist die Stichprobengröße für jede der Szenarienverteilungen (Stg) eingetragen. Das Ergebnis des Kolmogorov-Smirnov-Tests zur Prüfung auf Normalverteilung ist in der Spalte ks eingetragen.

Tendenziell ist zu erkennen, dass bei einer Verringerung der eingestellten Zielzeitlücke ebenfalls eine Verringerung der tatsächlichen mittleren Zeitlücke im Verkehrsablauf festzustellen ist. Dies ist der wesentliche kapazitätserhöhende Effekt, der angestrebt wird und der den Effekt der Regelung ausmacht.

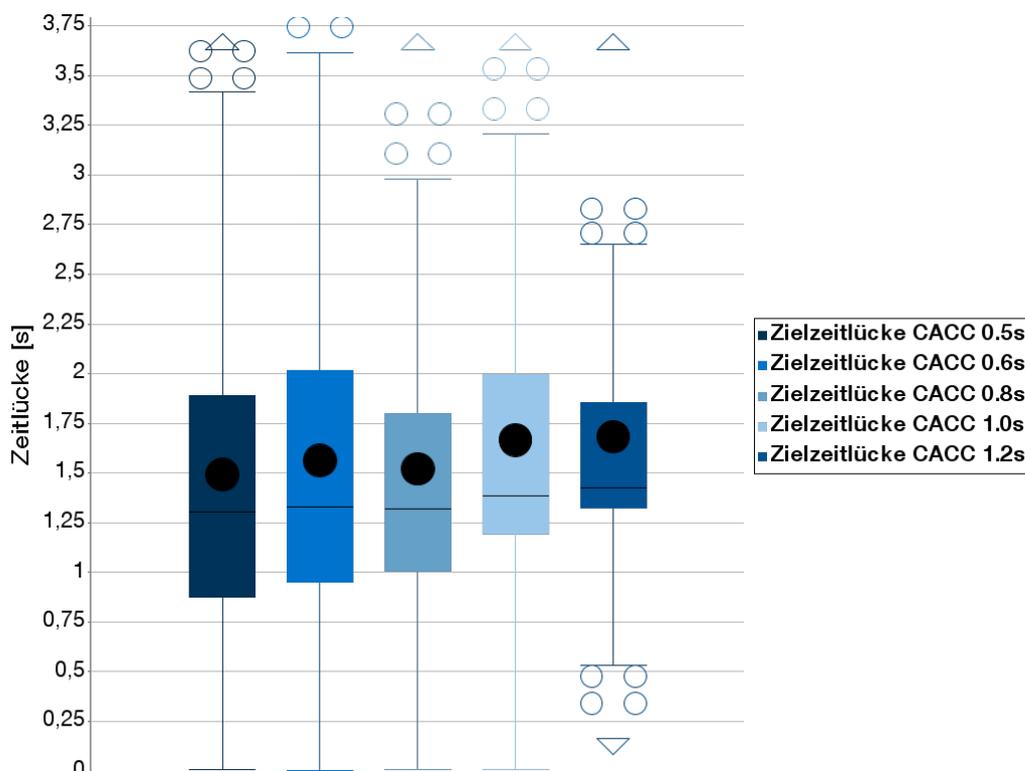


Bild 4.6 Vergleich der mittleren Zeitlücken als Ergebnis verschiedener Parameterkonfigurationen für die Zielzeitlücke (tht_c) von CACC-aktivierten Fahrzeugen.

Noch größere Evidenz liefert hierzu die Betrachtung der Verteilung aller Zeitlücken, die kleiner als 4,0 s sind, im Histogramm, das in Bild 4.7 dargestellt ist. Die Effektstärke der gemittelten Zeitlücken wird abgeschwächt durch eine große Zahl großer Zeitlücken (größer als 4,0 s),

die für den Verkehrsablauf nur bedingt relevant sind. Das Histogramm zeigt eine klare Verschiebung der Verteilung nach rechts. Dies offenbart eine Tendenz zu einer geringeren Zahl kleiner Zeitlücken hin zu größeren Zeitlücken für größere Werte der Zielzeitlücke. Damit lässt sich erkennen, dass die Eingabe der Zielzeitlücke als wesentlicher Funktionsparameter in den Funktionsalgorithmus des CACC-Systems die gewünschte und spezifizierte Wirkung, nämlich die Beeinflussung der tatsächlichen mittleren Zeitlücken der CACC-Fahrzeuge bewirkt.

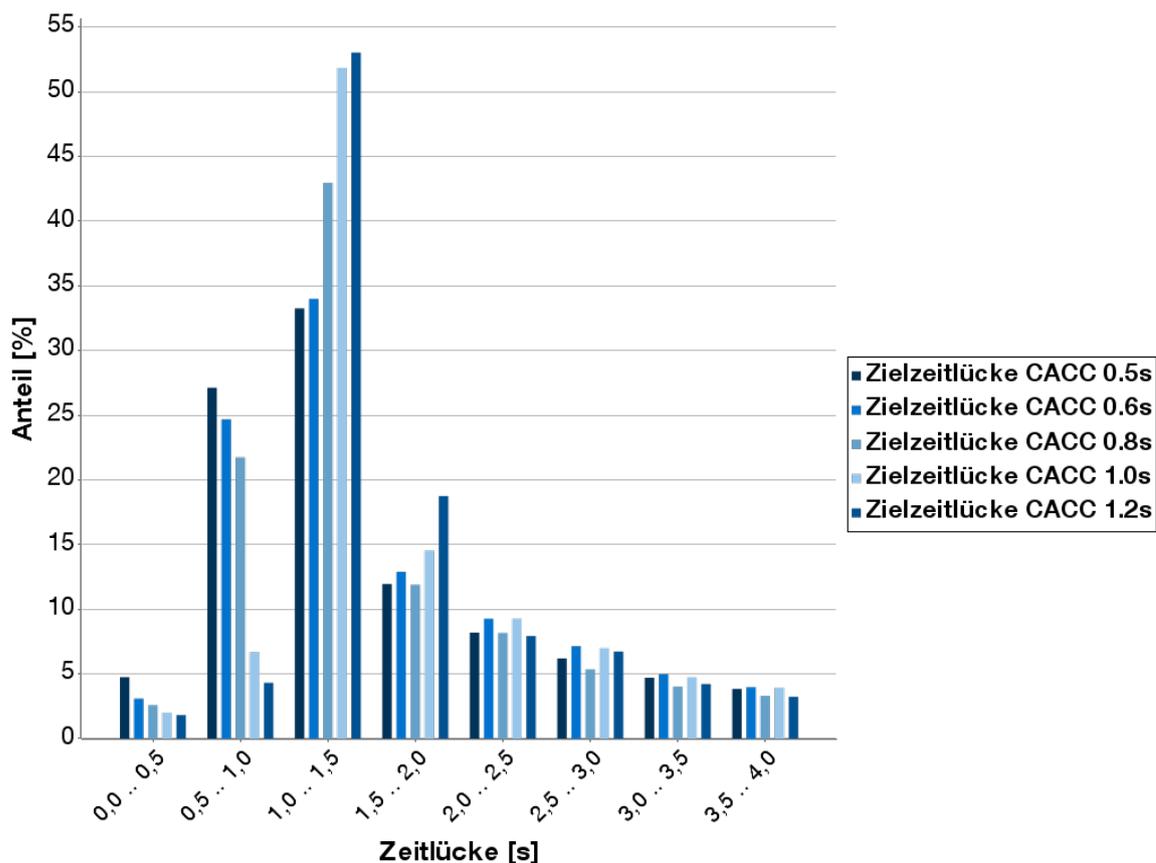


Bild 4.7 Vergleich der Zeitlückenverteilungen (Histogramm) als Ergebnis verschiedener Parameterkonfigurationen für den Parameter *Zielzeitlücke* (tht_c) von CACC-aktivierten Fahrzeugen.

4.5.2 Reduzierung der Modellkomplexität mittels Sensitivitätsmaße

Die Sensitivitätsanalyse hat gezeigt, dass keiner der untersuchten Parameter signifikant insensitiv gegenüber der resultierenden Wirkung im Gesamtverkehr ist. Es sind zudem in mindestens einer maßgebenden Kenngröße zumindest geringe relevante Effekte messbar. Dies bedeutet, dass kein Eingangsparameter im Sinne der Steuerungsfunktion überflüssig ist. Eine weitere Parameteroptimierung ist hier nicht notwendig. Hätte sich hier eine Insensitivität ergeben, könnte ein Parameter und dessen Beeinflussung in der Regelstrategie gestrichen werden.

Szenario	m [s]	sd [s]	ks	$tht_c = 0,6s$	$tht_c = 0,8s$	$tht_c = 1,0s$	$tht_c = 1,2s$
$tht_c = 0,5s$ Stg. = 306.989	1,50	0,86	0,15	diff = 0,07 p = 0,0 cd = 0,08	diff = 0,02 p = 0,0 cd = 0,03	diff = 0,17 p = 0,0 cd = 0,20	diff = 0,18 p = 0,0 cd = 0,24
$tht_c = 0,6s$ Stg. = 321.655	1,57	0,85	0,15		diff = 0,05 p = 0,12 cd = 0,06	diff = 0,10 p = 0,0 cd = 0,12	diff = 0,11 p = 0,0 cd = 0,15
$tht_c = 0,8s$ Stg. = 322.537	1,52	0,77	0,19			diff = 0,15 p = 0,0 cd = 0,19	diff = 0,16 p = 0,0 cd = 0,22
$tht_c = 1,0s$ Stg. = 328.449	1,67	0,77	0,19				diff = 0,01 p = 0,0 cd = 0,02
$tht_c = 1,2s$ Stg. = 328.815	1,68	0,70	0,21				

Tabelle 4.7 Einfluss des Parameters *Zielzeitlücke CACC* (tht_c) auf die mittlere Zeitlücke aller Fahrzeuge.

4.5.3 Funktionsoptimierung mittels Sensitivitätsmaße

Anhand der Szenarien für den Parameter *Beschleunigungszeit* t_a soll die Möglichkeit der Funktions- oder Systemoptimierung auf Basis von Ergebnissen dieser Analysen gezeigt werden. Damit soll die Möglichkeit gegeben werden, einen optimalen Wertebereich für die Parameterbelegung im Hinblick auf gewünschte Wirkungen des Systems auf den Verkehr zu identifizieren. Der Systemparameter *Beschleunigungszeit* t_a legt die Zeitdauer fest, innerhalb derer ein CACC-ausgestattetes Fahrzeug mittels Beschleunigung den angestrebten zeitlichen Zielabstand (definiert durch den Parameter *Zielzeitlücke CACC*, tht_c) erreicht haben soll. Bild 4.8 zeigt die Zeitlückenverteilungen aller simulierter Fahrzeuge für verschiedene Belegungen des Parameters *Beschleunigungszeit* der Systeme CACC-aktivierter Fahrzeuge. Berücksichtigt sind dabei in den Verteilungen aller Szenarien nur Zeitlücken, die kleiner als 4 s sind. Die Betrachtung größerer Zeitlücken ist im Zusammenhang mit der Pulkbildung nicht relevant.

In der Abbildung ist zu erkennen, dass die angestrebten Werte für die Zeitlückenverteilungen, die hier dem Zielwert tht_c nahe kommen sollen, am ehesten bei kleineren Werten für die Beschleunigungszeit erreicht werden. Werte zwischen $t_a = 2,0$ s und $t_a = 5,0$ s Sekunden scheinen akzeptable Zeitlückenverteilungen unterhalb eines Schwellenwertes von einer Sekunde zu liefern. Eine deutlichere Tendenz von Zeitlückenwerten über einer Sekunde zeigt sich für einen Parameterwert von $t_a = 7,0$ s.

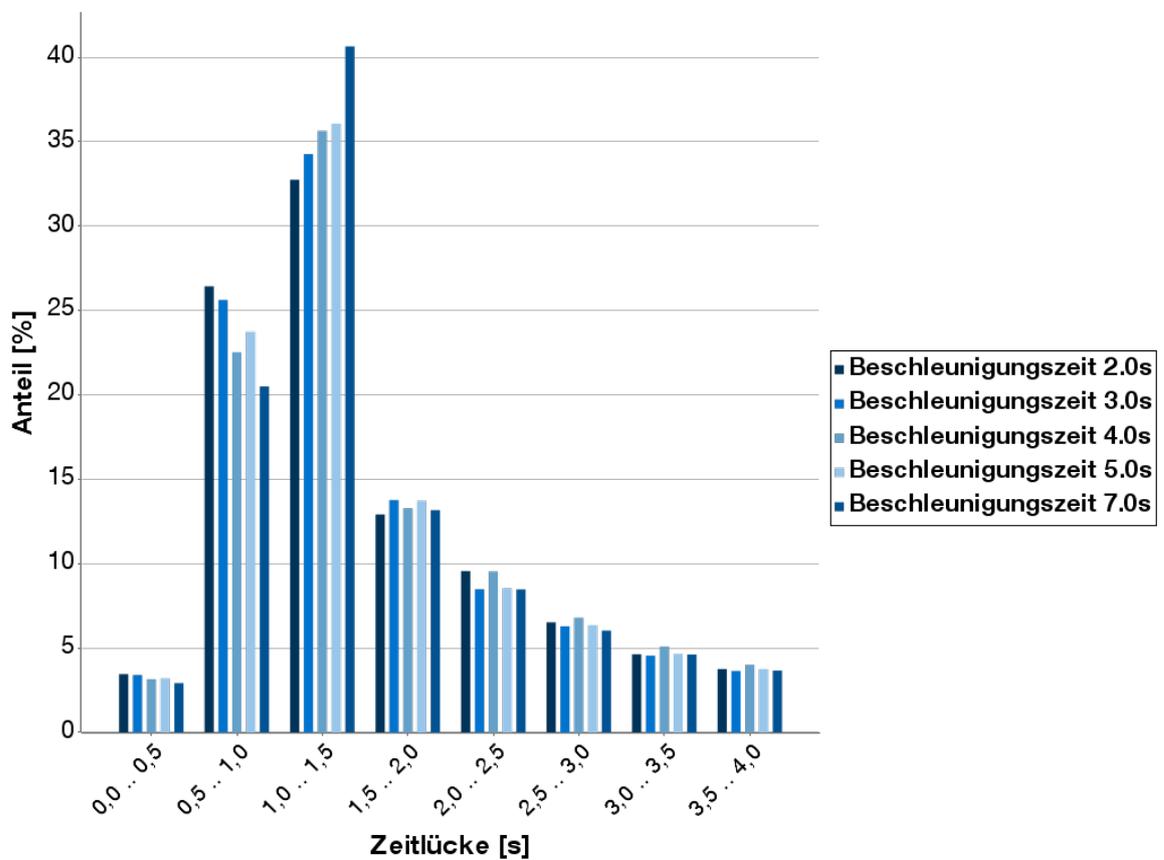


Bild 4.8 Vergleich der Zeitlückenverteilungen (Histogramm) als Ergebnis verschiedener Parameterkonfigurationen für den Parameter *Beschleunigungszeit* (t_a) von CACC-aktivierten Fahrzeugen.

Tabelle 4.8 lässt erkennen, dass signifikante Unterschiede in den Zeitlücken-Mittelwerten (bezeichnet mit m) zwischen den Parameterszenarien bestehen. Aufgrund der umfangreichen Stichprobengröße können Zufallseffekte ausgeschlossen werden. Die Betrachtung der Effektstärke (in der Tabelle mit cd bezeichnet) zeigt zwar, dass die Unterschiede der Mittelwerte auf einem eher niedrigen Niveau liegen. Dennoch lässt die Tendenz der Verteilung und die Signifikanz in den Verteilungsdifferenzen Rückschlüsse auf die funktionale Wirkung des Parameters Beschleunigungszeit zu.

Szenario	m [s]	sd [s]	ks	$t_a = 3,0s$	$t_a = 4,0s$	$t_a = 5,0s$	$t_a = 7,0s$
$t_a = 2,0s$ Stg. = 306.989	1,53	0,84	0,15	diff = 0,01 $p = \mathbf{0,0}$ $cd = 0,0$	diff = 0,06 $p = \mathbf{0,0}$ $cd = 0,07$	diff = 0,02 $p = \mathbf{0,0}$ $cd = 0,03$	diff = 0,03 $p = \mathbf{0,0}$ $cd = 0,04$
$t_a = 3,0s$ Stg. = 321.655	1,52	0,83	0,15		diff = 0,07 $p = \mathbf{0,0}$ $cd = 0,05$	diff = 0,03 $p = \mathbf{0,0}$ $cd = 0,03$	diff = 0,04 $p = \mathbf{0,0}$ $cd = 0,04$
$t_a = 4,0s$ Stg. = 322.537	1,59	0,84	0,19			diff = 0,04 $p = \mathbf{0,0}$ $cd = 0,04$	diff = 0,03 $p = \mathbf{0,0}$ $cd = 0,04$
$t_a = 5,0s$ Stg. = 328.449	1,55	0,82	0,19				diff = 0,04 $p = 0,07$
$t_a = 7,0s$ Stg. = 328.815	1,56	0,80	0,21				

Tabelle 4.8 Einfluss des Parameters *Beschleunigungszeit* (t_a) auf die mittlere Zeitlücke aller Fahrzeuge.

Für denselben Systemparameter, die Beschleunigungszeit t_a wird zusätzlich die resultierende Kenngröße *durchschnittliche Geschwindigkeit aller Fahrzeuge im Netz* betrachtet. In Bild 4.9 und Tabelle 4.9 ist zu erkennen, dass mit einem höheren Wert für t_a zwischen 2,0 s und 5,0 s die mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit zunächst absinkt, bei 7,0 s jedoch wieder ansteigt. Daraus lässt sich für die Effizienzwirkung des Systems bei hohen Werten wieder eine positive Tendenz vermuten. Dem gegenüber stehen jedoch die vorangehenden Betrachtungen zur mittleren Zeitlücke aller Fahrzeuge auf dem Streckenabschnitt. Dort wurde festgestellt, dass die kapazitätsfördernden kleinen Werte für die Zeitlücken der Fahrzeuge eher mit kurzen Beschleunigungszeiten erreicht werden. Außerdem fällt bei Betrachtung der Standardabweichung der Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten auf, dass diese mit größeren Werten für die Beschleunigungszeit (7,0 s) um 4 km/h geringer ist im Vergleich zu einer kleinen Beschleunigungszeit von 2,0 s. Da bei einem Wert von

2,0 s sowohl eine wunschgemäße Zeitlückenverteilung als auch eine verhältnismäßig hohe Durchschnittsgeschwindigkeit erzielt werden kann, ist dieser als geeigneter Wert für die Parameterbelegung hinsichtlich der *Effizienzwirkung* des Systems zu empfehlen.

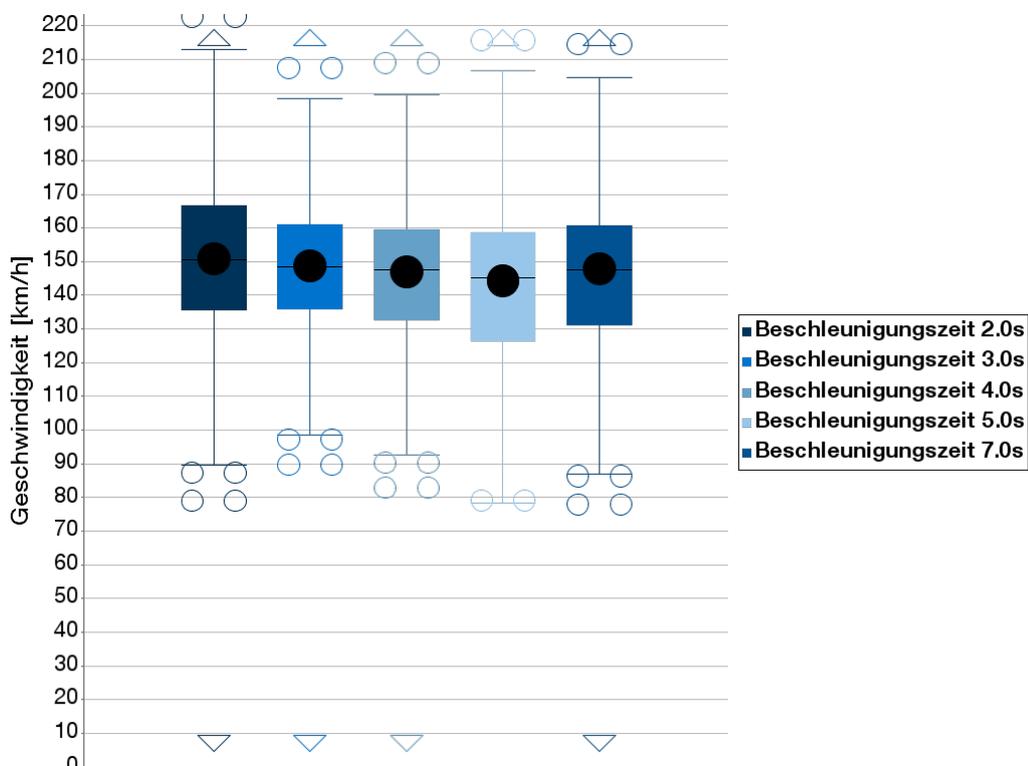


Bild 4.9 Vergleich der Mittelwerte der Einzelfahrzeuggeschwindigkeit als Ergebnis verschiedener Parameterkonfigurationen für den Parameter *Beschleunigungszeit* (t_a) beim Aufschließen von CACC-aktivierten Fahrzeugen zu einem CACC-Pulk.

Demgegenüber steht die Wirkung auf die *Verkehrssicherheit*. Zur relativen Betrachtung aller aufgetretener kritischer Situationen während der Simulation dieser Szenarien wurden die Anzahlwerte der kritischen Situationen aller vier Szenarien aufsummiert und dann der jeweilige prozentuale Anteil jedes Szenarios an dieser Gesamtsumme im Diagramm in Bild 4.10 aufgetragen. Die Summe der Prozentwerte aller vier Balken beträgt daher genau 100 %. Wie in Bild 4.10 zu erkennen ist, verringert sich der Anteil der kritischen Situationen mit höheren Werten für die Beschleunigungszeit stetig. Hinsichtlich der Verkehrssicherheit wäre demnach eher ein höherer Wert für die Beschleunigungszeit anzustreben. Diese Diskussion zeigt, dass der Prozess der Identifikation einer optimalen Parameterbelegung von der zu optimierenden Wirkdimension abhängen kann und Expertenwissen erfordert. Die gezeigten Ergebnisse der Parametersensitivitätsanalyse legen die notwendige Grundlage für diese Abwägung.

Zu bedenken ist in diesem Fall darüber hinaus die Tatsache, dass die Bewertung der Kritikalität der in Bild 4.10 aufgezeigten kritischen Situationen auf Schwellenwerten beruhen, die aus Untersuchungen menschlichen Verhaltens hervorgegangen sind (siehe Abschnitt

Szenario	m [km/h]	sd [km/h]	ks	$t_a = 3,0s$	$t_a = 4,0s$	$t_a = 5,0s$	$t_a = 7,0s$
$t_a = 2,0s$ Stg. = 306.989	150,81	27,25	0,06	diff = 2,17 p = 0,0 cd = 0,08	diff = 3,95 p = 0,0 cd = 0,15	diff = 6,34 p = 0,0 cd = 0,24	diff = 2,31 p = 0,0 cd = 0,09
$t_a = 3,0s$ Stg. = 321.655	148,64	24,10	0,07		diff = 1,78 p = 0,0 cd = 0,07	diff = 4,17 p = 0,0 cd = 0,17	diff = 0,14 p = 0,0 cd = 0,01
$t_a = 4,0s$ Stg. = 322.537	146,86	24,25	0,06			diff = 2,39 p = 0,0 cd = 0,10	diff = 1,64 p = 0,0 cd = 0,07
$t_a = 5,0s$ Stg. = 328.449	144,47	24,31	0,04				diff = 4,03 p = 0,0 cd = 0,17
$t_a = 7,0s$ Stg. = 328.815	148,50	23,45	0,06				

Tabelle 4.9 Einfluss des Parameters *Beschleunigungszeit* (t_a) auf die mittlere Geschwindigkeit aller Fahrzeuge.

4.2.3.1). Durch stark verkürzte und ablenkungsfreie Reaktionszeiten des Regelsystems im CACC-ausgestatteten Fahrzeug können als kritisch eingestufte Fahrsituationen tatsächlich wesentlich harmloser sein. Derartige systemspezifische Fragestellungen sind nicht Gegenstand dieser Arbeit, sollen jedoch einen Eindruck geben, welche Randbedingungen bei der Auswahl der geeigneten Parameterbelegung letztlich berücksichtigt werden müssen.

Ein weiterer Parameter, der im Rahmen einer möglichen Funktionsoptimierung betrachtet wird, ist der gewünschte Wert für die Beschleunigung, die das CACC-Fahrzeug anwendet, um zum Zielabstand auf einen vorausfahrenden CACC-Pulk hin zu beschleunigen. Die Beschleunigung zum Aufschließen auf den CACC-Pulk ist bezeichnet mit a_{dd} . In Bild 4.11 sind dazu die vier simulierten Szenarien für vier verschiedene Parameterbelegungen eingezeichnet. In der relativen Betrachtung der kritischen Situationen fällt auf, dass im Fall einer Parameterbelegung von $0,2 \frac{m}{s^2}$ die wenigsten kritischen Situationen aufgetreten sind, im Fall einer Belegung von $0,7 \frac{m}{s^2}$ und $1,0 \frac{m}{s^2}$ eine höhere Anzahl. Deutlich mehr werden es bei stärkeren Beschleunigungen im Bereich von $1,5 \frac{m}{s^2}$

Diese Erkenntnis würde nahelegen, dass ein möglichst niedriger Wert für diesen Parameter die sinnvollste Entscheidung wäre. Dem gegenüber stehen Beobachtungen der Effizienzwirkung des CACC-Systems. Bild 4.12 zeigt dazu die Auswirkungen der Parametervariation der *Beschleunigung zum Aufschließen* auf den CACC-Pulk auf die mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit.

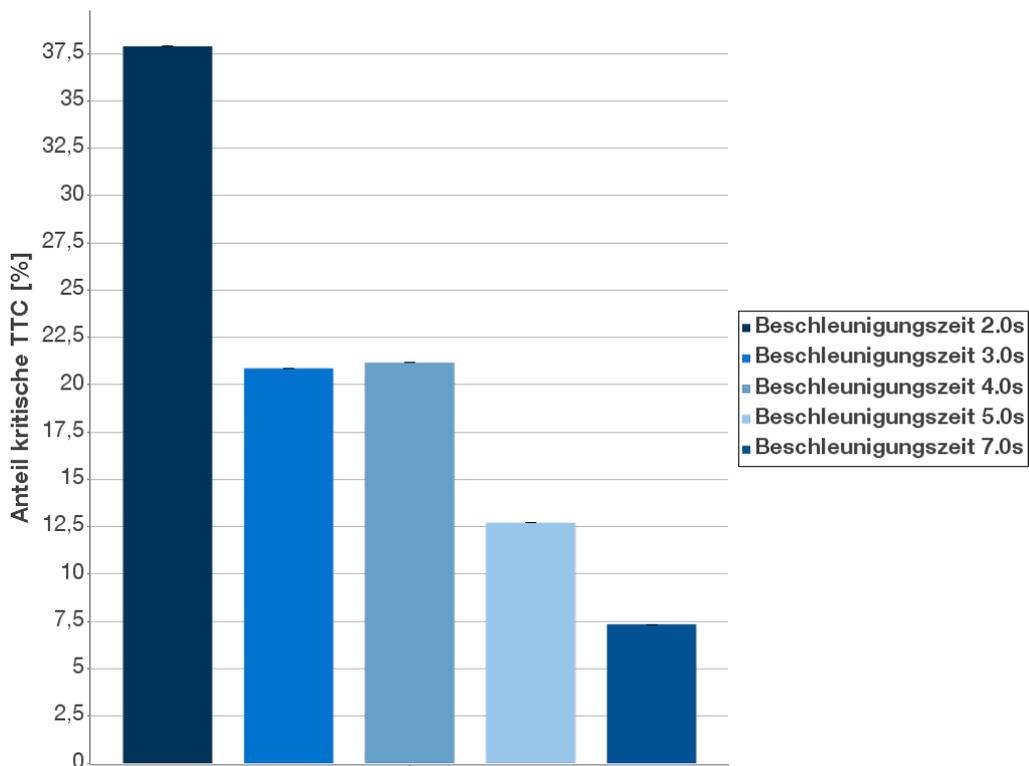


Bild 4.10 Vergleich der relativen Verteilung kritischer Situationen als Ergebnis verschiedener Parameterkonfigurationen für den Parameter *Beschleunigungszeit* (t_a) von CACC-aktivierten Fahrzeugen.

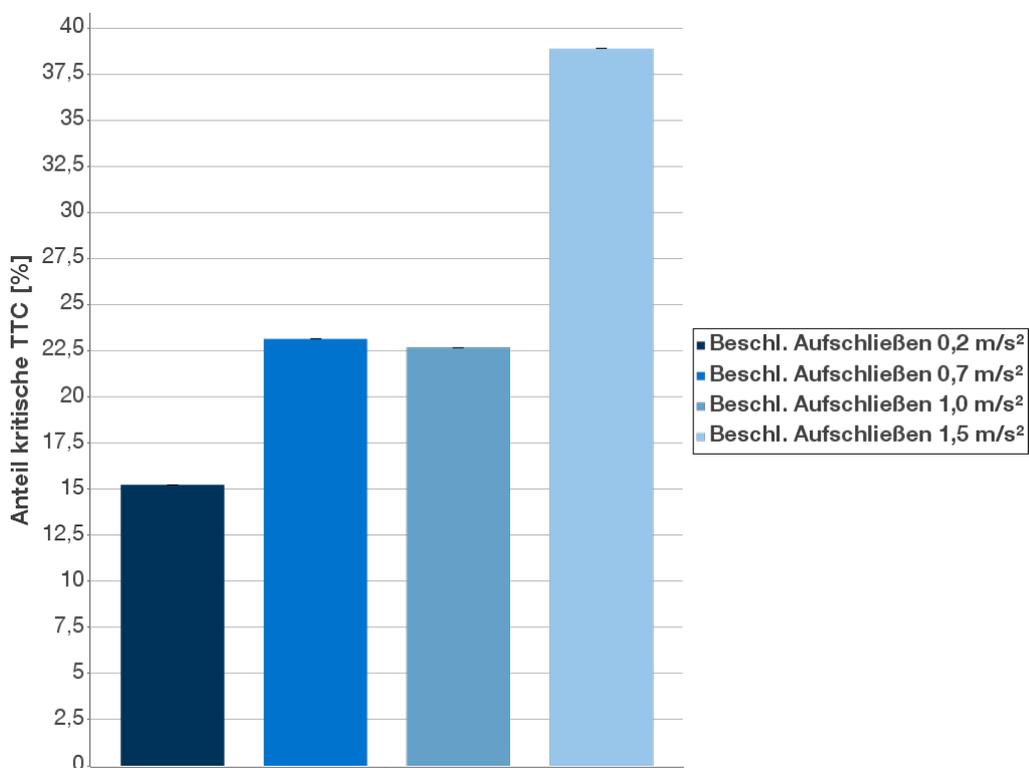


Bild 4.11 Vergleich der Anteile kritischer Situationen als Ergebnis verschiedener Parameterkonfigurationen für den Parameter *Beschleunigung zum Aufschließen auf CACC-Pulk* (a_{dd}) von CACC-aktivierten Fahrzeugen.

keit aller Fahrzeuge im Netz. Es ist deutlich zu erkennen, dass geringe Beschleunigungswerte eine signifikant niedrigere Durchschnittsgeschwindigkeit zur Folge haben.

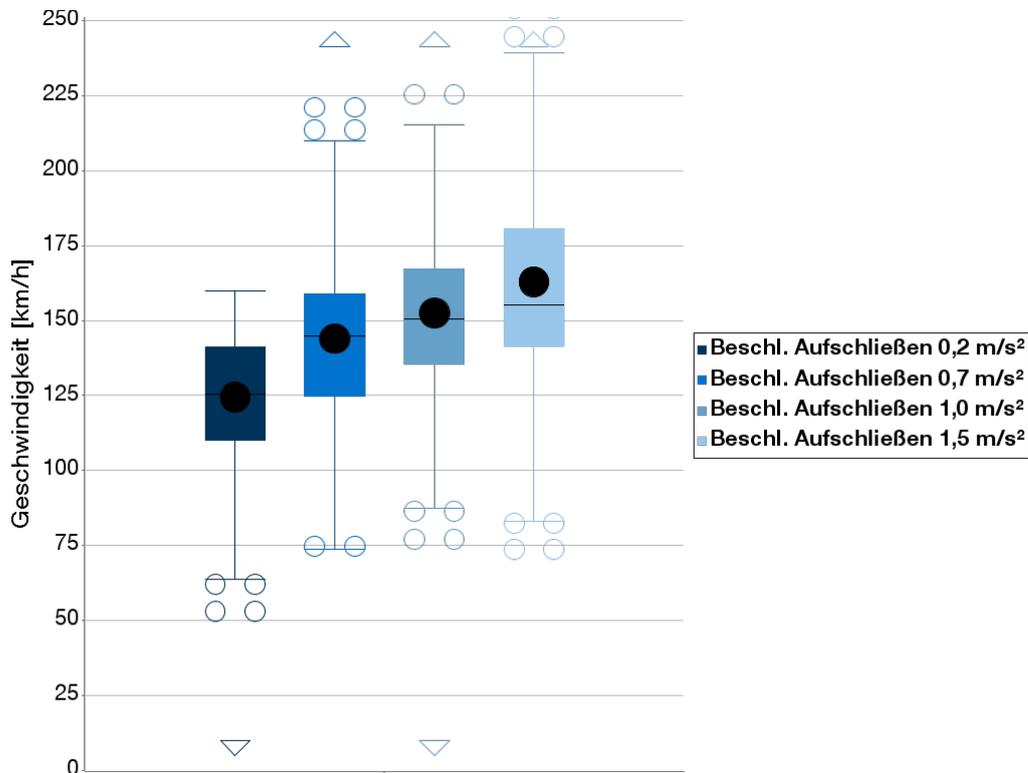


Bild 4.12 Vergleich der mittleren Fahrzeuggeschwindigkeiten als Ergebnis verschiedener Parameterkonfigurationen für den Parameter *Beschleunigung zum Aufschließen auf CACC-Pulk* (a_{dd}) von CACC-aktivierten Fahrzeugen.

Die entsprechenden Vergleichswerte für die vier Szenarien sind in Tabelle 4.10 zu finden.

4.5.4 Einfluss von Umgebungsvariablen auf die Systemmodellwirkung

Ein weiterer Aspekt, der bei den Sensitivitätsanalysen über die Betrachtung der Einflüsse der Systemparameter hinaus betrachtet wird, ist der Einfluss von Umgebungsparametern (siehe Abschnitt 3.6.3.3) auf die beeinflussende Wirkung des Systemmodells. Eine wesentliche Umgebungsgröße, die im Rahmen der Szenarienkonfiguration als einer der zu variierenden Parameter definiert wurde, ist die Kommunikationsreichweite. Diese beschreibt die räumliche Ausdehnung ausgehend vom Sender einer V2X-Nachricht, innerhalb derer alle Fahrzeuge diese Nachricht mit Sicherheit empfangen.

Bild 4.13 zeigt die Verteilung der in Abschnitt 4.2.4.1 beschriebenen Zustände für das CACC-System. Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass die Anzahl der Pulks pro Zeiteinheit mit höherer Kommunikationsreichweite stetig steigt. Zu sehen ist das am Ansteigen des Anteils von Fahrzeugen im Zustand *Leader*, denn jeder CACC-Pulk hat genau ein Führungsfahrzeug im *Leader*-Zustand. Zudem fällt auf, dass bei einer besonders kleinen Reichweite von nur 100 Metern verhältnismäßig wenige Fahrzeuge in CACC-Pulks fahren. Dies ist erkennbar

Szenario	m [km/h]	sd [km/h]	ks	$a_{dd} = 0,7s$	$a_{dd} = 1,0s$	$a_{dd} = 1,5s$
$a_{dd} = 0,5s$ Stg. = 363.238	124,63	18,35	0,08	diff = 19,32 p = 0,0 cd = 0,87	diff = 27,94 p = 0,0 cd = 1,17	diff = 38,47 p = 0,0 cd = 1,40
$a_{dd} = 0,7s$ Stg. = 312.121	143,95	26,15	0,04		diff = 8,62 p = 0,0 cd = 0,31	diff = 19,15 p = 0,0 cd = 0,61
$a_{dd} = 1,0s$ Stg. = 305.433	152,57	29,38	0,07			diff = 10,53 p = 0,0 cd = 0,32
$a_{dd} = 1,5s$ Stg. = 306.468	163,10	36,59	0,11			

Tabelle 4.10 Einfluss des Parameters *Beschleunigung zum Aufschließen auf CACC-Pulk* (a_{dd}) auf die mittlere Geschwindigkeit aller Fahrzeuge.

am geringen Anteil von Fahrzeugen in den Zuständen *Leader* und *Follower*. In dieser Konfiguration befinden sich die Fahrzeuge überwiegend im Zustand *ACC*, der aktiviert ist, wenn Fahrzeuge nicht per V2X-Kommunikation erfasst werden und daher die Regelung der Fahrdynamik auf physikalischen Sensoren basiert, was dem Verhalten eines reinen ACC-ausgestatteten Fahrzeugs entspricht. Schon bei einer Erhöhung der Reichweite auf 300 m erhöht sich der Anteil der Fahrzeuge in CACC-Pulks deutlich. Zu beachten ist, dass zur unabhängigen Betrachtung der Reichweite der Einfluss von Paketverlusten, Latenzen und Rauschen im Zuge der Nachrichtenübertragung per ITS-G5 bewusst vernachlässigt wurde.

4.5.5 Analyse der Verkehrswirkungen mittels makroskopischer Kenngrößenanalyse

Mithilfe des in dieser Arbeit gewählten Ansatzes der varianzbasierten Analysestudie ist zusätzlich zur Untersuchung der Systemparametersensitivität auch eine erste Interpretation hinsichtlich der tatsächlichen Wirkungen des untersuchten Verkehrssystems (hier des CACC-Systems) auf die Verkehrseffizienz und die Verkehrssicherheit möglich. Diese exemplarische Studie zeigt eine mögliche Darstellung einer Wirkungsanalyse im Verkehr. Konkret besteht das Untersuchungsziel in der Identifikation des Einflusses verschiedener Ausstattungsraten und zweier Qualitätsabstufungen im Hinblick auf die V2X-Nachrichtenübertragung: Die Annahme einer idealen Kommunikation gegenüber einer realistischeren Kommunikationsmodellierung auf Basis des Modells VCOM.

In Bild 4.14 ist das Ergebnis des Szenarienvergleichs hinsichtlich der Kenngröße *mittlere Zeitlücke aller Fahrzeuge im Simulationsnetz* dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in der

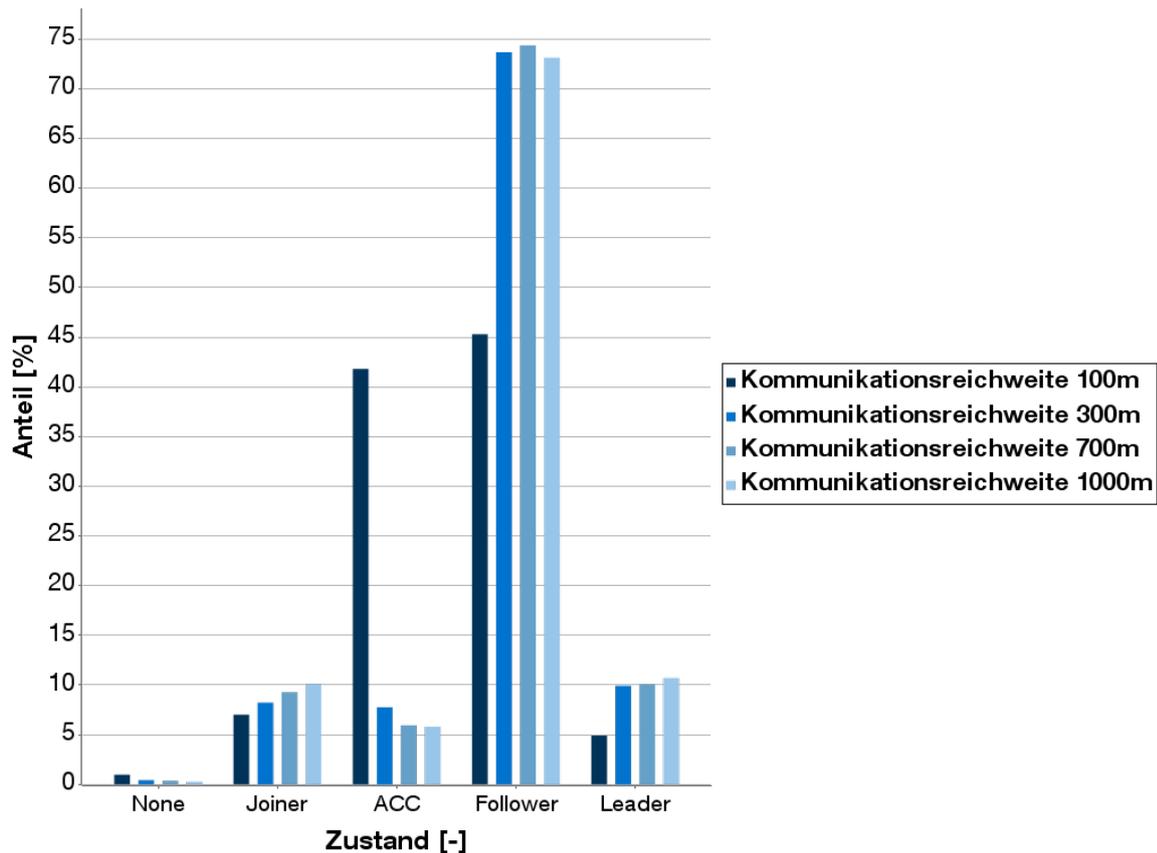


Bild 4.13 Vergleich der Verteilung der CACC-Zustände (Histogramm) als Ergebnis verschiedener Ausprägungen für die V2X-Kommunikationsreichweite von CACC-aktivierten Fahrzeugen.

aufgeführten Reihenfolge der Szenarien die mittlere Zeitlücke immer geringer wird. Dies bedeutet, dass sowohl eine höhere Ausstattungsrate mit dem CACC-System als auch eine verlustärmere Nachrichtenübertragung dem tatsächlichen Ziel, der Erhöhung der Kapazität durch Verschiebung der Zeitlückenverteilung hin zu kleineren Zeitlücken, zuträglich ist.

Ausgehend von dieser Beispielanalyse sind verschiedene weitere Untersuchungen und Darstellungen relevanter Kenngrößen sinnvoll. Insbesondere ist hier auch der Aspekt der Verkehrssicherheit von Interesse, da geringere Fahrzeugabstände und Zeitlücken einerseits die Wahrscheinlichkeit von Auffahrunfällen erhöhen können, andererseits die Reaktionszeiten der (C)ACC-Systeme wesentlich geringer sind im Vergleich zu menschlichen Fahrern. In der Gesamtbewertung ergibt sich dadurch ein Potential für eine großräumige Verringerung der Kritikalität auf der untersuchten Strecke bei gleichzeitiger Erhöhung der Streckenkapazität. Das vorgestellte Rahmenwerk bietet die Möglichkeit weiterführende Studien zur Untersuchung dieses Sachverhaltes durchzuführen.

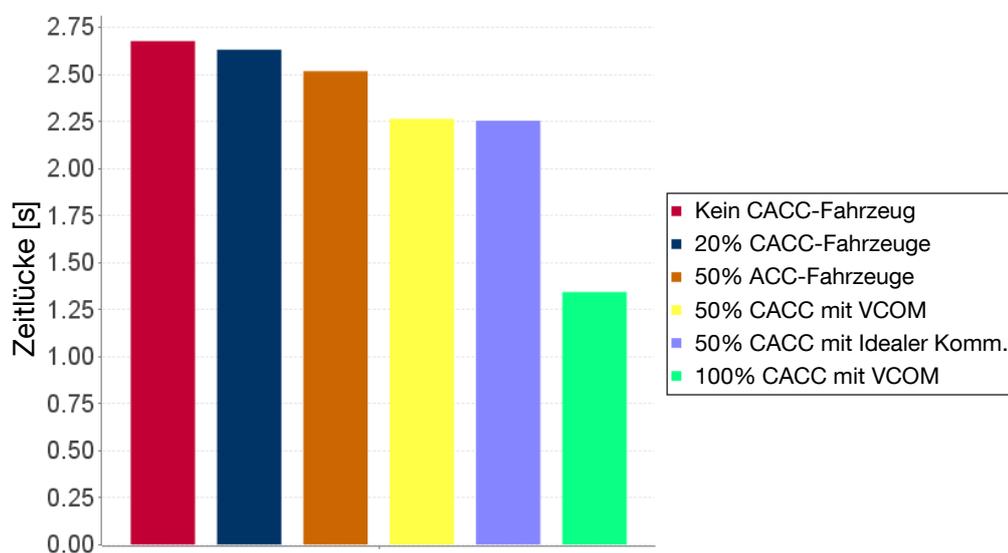


Bild 4.14 Vergleich der mittleren Zeitlücken als Ergebnis verschiedener Ausstattungsdaten und CACC-Ausprägungen.

5 Bewertung

Zur abschließenden Beurteilung des vorgestellten technischen, methodischen und analytischen Modellierungsrahmens zur Verkehrssimulation Intelligenter Verkehrssysteme erfolgt eine Bewertung hinsichtlich der Kriterien Zweckmäßigkeit und Vollständigkeit, erreichbarer Modellkomplexität sowie Übertragbarkeit. Grundlage für die Bewertung ist die Umsetzung und Analyse im Rahmen der Referenzstudie, in der das Rahmenwerk konkret angewendet und für ausgewählte Analysen genutzt wurde.

5.1 Zweckmäßigkeit und Vollständigkeit

Die zentralen Elemente des Modellierungsrahmens aus Kapitel 3 wurden in der Referenzstudie in Kapitel 4 zur Modellierung eines Beispielsystems eingesetzt. Dabei haben sich die Komponenten aus dem Softwareframework zur Spezifikation und Implementierung als sehr nützlich erwiesen. Zum einen war eine Systemarchitektur vorgegeben, die implizit eine strukturierte Spezifikation sicherstellte. Zum anderen konnte die Entwicklung sehr effizient ablaufen, da grundlegende Konzepte, wie die Anbindung der V2X-Nachrichtenübertragung oder auch Funktionalitäten zur Datenbereitstellung, wiederverwendet werden konnten und nicht von Grund auf neu implementiert werden mussten. Aufgrund der generischen Architektur des Softwareframeworks ist dieses Erkenntnis direkt übertragbar auf die Umsetzung vieler vergleichbarer Systemmodelle. Das Konzept der Parametersensitivitätsanalysen zur Optimierung des Systemmodells konnte konkret umgesetzt und in entsprechenden Simulationen verwendet werden. Die Sensitivitätsanalysen lieferten Erkenntnisse über geeignete Modellparameterbelegungen, die als sinnvoll erachtet werden konnten im Hinblick auf eine weiterführende Modelloptimierung.

5.2 Erreichbare Modellkomplexität und Effizienz

Eines der wichtigsten Ziele des in dieser Arbeit beschriebenen Modellierungsansatzes ist die Entwicklung softwarebasierter Systemmodelle Intelligenter Verkehrssysteme, die zum einen eine einfache und strukturierte Implementierung vorsieht und zum anderen eine hinsichtlich der Simulationslaufzeit möglichst schnelle und speichersparende Simulation ermöglicht.

5.2.1 Strukturelle Komplexität

Um das zu entwickelnde Systemmodell so verständlich wie möglich zu gestalten, wurde für die Spezifikation des funktionalen Ablaufs die Nutzung von Zustandsautomaten empfohlen. Dadurch entsteht ein anschauliches Ablaufmodell der Funktionalität, das die Implementierung erheblich erleichtern kann. Diese formale Repräsentation ermöglicht

außerdem ein schematisches Vorgehen bei der Ablaufoptimierung. Mit Methoden aus der Automatentheorie kann auf effiziente Weise ein zustandsminimaler Automat abgeleitet werden.

Des Weiteren wurde eine Analysemethodik und entsprechende Softwarekomponenten zur Auswertung entwickelt, die auf Basis von Sensitivitätsanalysen diejenigen Modellparameter ermittelt, die keinen wesentlichen Einfluss auf die Verkehrsbeeinflussung durch das Systemmodell haben. So kann auch die Parameterkomplexität sinnvoll optimiert werden.

5.2.2 Laufzeiteffizienz und Speicherbedarf

Das Softwareframework im vorgestellten Modellierungsrahmen enthält wiederverwendbare Komponenten, Datenstrukturen und Rahmenapplikationen, die darauf ausgelegt sind, dass die damit modellierten Systeme möglichst wenige Iterationen über die im Simulationsnetz befindlichen Fahrzeuge und gegebenenfalls ausgesendete V2X-Nachrichten durchführen müssen. Damit ist sichergestellt, dass die spätere Simulationslaufzeit skalierbar bleibt. Das ist insbesondere vor dem Hintergrund wichtig, dass die Systemmodelle in der Realität darauf ausgelegt sind, einzelne Fahrzeuge und/oder deren Fahrer geeignet zu beeinflussen. In der Verkehrssimulation sind dagegen häufig mehrere tausend Fahrzeuge gleichzeitig zu steuern. Eine vergleichbare Problematik ergibt sich bei der Betrachtung des Speicherbedarfs zur Verkehrssimulation Intelligenter Verkehrssysteme. Fahrzeuginformationen und andere zu berücksichtigende Elemente im simulierten Verkehrsumfeld müssen im Arbeitsspeicher gehalten werden, um von der Simulation verarbeitet und mit ihr synchronisiert werden zu können. Aus diesem Grund sieht das Softwareframework Datenstrukturen vor, die zum einen Redundanzen in der Sammlung von Fahrzeugdaten vermeiden und zum anderen nur dann belegt werden, wenn sie auch tatsächlich gebraucht werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass, je nach Ausdehnung des simulierten Streckennetzes und der verwendeten Simulationssoftware, generell ein hoher Bedarf an freiem Arbeitsspeicher entstehen kann. Der vorgestellte Modellierungsrahmen trägt diesem Umstand Rechnung, indem geeignete Datenstrukturen sowie vorgegebene Rahmenkomponenten eine effiziente Modellierung erleichtern, wodurch in vielen Fällen eine Simulation in Echtzeit ermöglicht werden kann. Durch eine effizientere Modellierung auf diese Weise können mehrere Stunden, Tage oder sogar Wochen an Simulationszeit eingespart werden.

5.3 Übertragbarkeit

Im folgenden Abschnitt soll geprüft werden, inwiefern sich die vorgestellte Methodik und die entwickelten Komponenten zur Modellierung auf Randbedingungen übertragen lassen, die sich von den in dieser Arbeit gegebenen unterscheiden.

5.3.1 Übertragbarkeit auf weitere Anwendungen im Autobahnverkehr

Die Anwendbarkeit des Frameworks wurde anhand eines hochautomatisierten kooperativen Fahrzeugbeeinflussungssystems geprüft. Es ist zu prüfen, ob sich auch andere Applikationen mit den vorgestellten Komponenten und der vorgeschlagenen Methodik effizient und sinnvoll modellieren lassen.

Betrachtung der Beeinflussung Zunächst stellt sich die Frage, ob mit der Beeinflussung von Bewegungsgrößen wie Beschleunigung, Zielfahrstreifen und Wunschroute jede modellrelevante Art der fahrzeugbezogenen Verkehrsbeeinflussung abgedeckt werden kann. Hierzu ist festzustellen, dass die Regelstrategie des Referenzsystems ohne Schnittstellenänderungen in das Software-Framework integriert werden konnte. Damit ist sie vollständig austauschbar und vergleichbare Regelungen sind analog umsetzbar. Es stehen darüber hinaus weitere Komponenten, die im Rahmen der Referenzstudie nicht genutzt wurden, zur Verfügung. So können beispielsweise ereignisbasierte Warnsysteme wie eine Hindernis- oder Stauwarnung die Erzeugung von Positionsketten nutzen, um Beeinflussungsbereiche der entsprechenden Warnungen hochdynamisch zu generieren.

Dies bedeutet, dass keine Änderungen im Ablauf und in der Einbindung in das Softwareframework zu erwarten sind, wenn die Systemausgabe eine der drei zentralen Stellgrößen im Verkehr beeinflusst.

Modellierung von Verkehrssystemen auf Seiten der Verkehrsinfrastruktur Der zweite Aspekt dieser Betrachtung ist die Frage, inwiefern sich die Art der Modellierung eignet, wenn im Fahrzeug selbst keine Algorithmik verortet ist, sondern jegliche Beeinflussung durch Infrastruktureinrichtungen erfolgt.

Zur Beantwortung dieser Fragestellung ist zu bedenken, dass Verkehrsbeeinflussung durch Einrichtungen der Verkehrsinfrastruktur, beispielsweise dynamische Verkehrszeichen oder verkehrszustandsabhängige Umleitungsempfehlungen, eine Art der passiven Einzelfahrzeugbeeinflussung darstellen. Somit kann unter Einbeziehung eines geeigneten Fahrverhaltensmodelles und einer entsprechenden statistischen Verteilung für Ort und Zeit der Fahrerreaktion auf eine dynamische Empfehlung seitens der Verkehrsinfrastruktur

wiederum genau der in dieser Arbeit beschriebene Ablauf der Systemmodellierung verwendet werden.

5.3.2 Übertragbarkeit auf städtische Umgebungen

Die Herausforderungen, die sich bei der Modellierung verkehrstechnischer Anwendungen im Innerortsverkehr ergeben, unterscheiden sich in einigen Aspekten von denjenigen bei der Betrachtung von Schnellstraßen. Ein großer Teil der innerörtlichen Verkehrssteuerung besteht in der Regelung des Verkehrs durch Lichtsignalanlagen. Die Abbildung von Lichtsignalanlagen in der Verkehrssimulation ist oft an spezifische Schnittstellen einzelner Verkehrssimulationsanwendungen gebunden. Diese können nicht ohne Weiteres mit dem vorgestellten Softwarerahmen angebinden werden. Allerdings wäre eine Anbindung externer LSA-Module, etwa durch eine standardisierte OCIT-Schnittstelle möglich. In einem weiteren Schritt ist zudem die Modellierung virtueller Lichtsignalanlagen, die allein über die dynamische Beeinflussung von Fahrzeugparametern wirken würde, denkbar. Andere Verkehrssysteme, wie innerstädtisches Umleitungsmanagement oder dynamische Geschwindigkeitsregelungen unterscheiden sich in der Art der Beeinflussung nicht grundsätzlich von den Autobahnsystemen und können deshalb im Kontext des vorgestellten Modellierungsrahmen spezifiziert und modelliert werden.

5.3.3 Nutzung unterschiedlicher Simulationswerkzeuge

Der Modellierungsrahmen wurde als vollständig generisch hinsichtlich der Verwendung von Verkehrssimulationsanwendungen beschrieben. Dies bedeutet, dass die modellierte Funktionalität ohne Änderungen am Systemmodell selbst in verschiedenen Umgebungen simuliert werden kann. Das Referenzsystem wurde unter Nutzung einer Adapterfunktionalität des Modellierungsrahmens an die Simulationssoftware VISSIM und dessen spezifische Programmierschnittstelle *C2X-API* angebinden. Es kann festgestellt werden, dass in der Anwendung selbst keinerlei Bezug auf die VISSIM-Schnittstellen genommen werden musste. Die generische Anbindung mittels der Komponenten des Modellierungsrahmens war also gewährleistet.

Es ist zu erwähnen, dass zur Nutzung einer anderen Simulationssoftware die Anbindung des Frameworks mithilfe eines spezifischen Adapters notwendig ist, wie in Abschnitt 3.3.3 erläutert. Dies stellt wiederum die generische Anbindung jeder möglichen modellierten Anwendung über das Framework an diese Simulationsanwendung sicher. Wichtig ist dabei, dass dieses Simulationswerkzeug in geeigneten Schnittstellen die in den Komponenten des Modellierungsrahmens vorgesehenen Methoden und Parameter vollständig zur Verfügung stellen muss. Ist dies nicht gegeben, müssen Lösungen gefunden werden, in der modellierten

Applikation ohne diese Funktionalitäten auszukommen. Diese Einschränkung ist jedoch keine spezifische Problematik für den generischen Modellierungsrahmen, da sie auch dann besteht, wenn ein nicht-generisches Modell direkt an diese Simulationssoftware angebunden würde.

Ein weiterer erwähnenswerter Aspekt ist eine denkbare Anbindung der modellierten Systemmodelle an Fahrsimulatoren, wie etwa den von BULD ET AL. [2003] beschriebenen Simulator zur Evaluierung von Fahrerassistenzsystemen. In diesem Zusammenhang ist auch die im Projekt „UR:BAN - Mensch im Verkehr“ (siehe [MANNSTETTEN ET AL. 2013]) vorgenommene Kopplung verschiedener Simulatorumgebungen im Verkehrsumfeld interessant. Die zugrunde liegende Software der jeweiligen Simulatoren enthält Schnittstellen zu anderen Arten von Simulatoren sowie zu externen Applikationen. So werden im UR:BAN-Teilprojekt SIM (Simulation und Verhaltensmodellierung) beispielsweise Motorrad- oder LKW-Simulatoren an PKW-Simulatoren angebunden, um Interaktionen zwischen den unterschiedlichen Typen von Fahrzeugen und deren Fahrern zu untersuchen. Das Konzept eines systematischen Modellierungsrahmens zur Entwicklung und Optimierung der zu untersuchenden Systemfunktionen kann auch in diesem Umfeld wertvoll sein, um bestehende Anbindungen effizienter zu gestalten und neue Entwicklungen in einen systematischen Entwicklungsprozess einzubinden.

Die aktuelle Konzeption und die Softwarekomponenten des in dieser Arbeit vorgestellten Frameworks sind auf derartige Anforderungen nicht angepasst. Die einzelnen Aspekte und Komponenten sind jedoch bewusst modular aufgebaut und beschrieben, so dass ausgewählte Konzepte und Schnittstellen hinsichtlich einer möglichen Erweiterung übertragbar sind.

5.3.4 Übertragbarkeit auf andere Fachdisziplinen

Wie in Abschnitt 2.2 festgestellt wurde, stellt die Modellierung ein wesentliches Werkzeug zur Veranschaulichung, Ablaufoptimierung und Wirkungsanalyse in den verschiedensten Fachrichtungen dar. Die in dieser Arbeit betrachteten Abläufe und Komponenten der Modellierung nehmen Bezug auf spezifische Anforderungen verkehrstechnischer Einrichtungen. Aus diesem Grund ist eine Modellierung fachfremder Applikationen anhand der hier definierten Prozesse und Softwarekomponenten zunächst nicht sinnvoll. Allerdings können einige Grundprinzipien sicherlich Anregungen und Vorstellungen für das generelle Vorgehen bei der Modellierung liefern.

5.4 Beantwortung der Forschungsfragen

In der übergreifenden Bewertung soll Bezug auf die eingangs gestellten Forschungsfragen genommen werden. Zentral war dabei die Frage nach der Möglichkeit einer generischen Systematik bei der Modellierung Intelligenter Verkehrssysteme, die in der Verkehrssimulation auf ihre verkehrsbezogenen Wirkungen hin untersucht werden sollen.

Zur Beantwortung dieser Fragestellung wurde schrittweise aus dem Versuch einer systematischen Vorgehensbeschreibung ein Framework konzipiert, das sich als geeignet erwies, die gestellten Anforderungen zu erfüllen. Dies lässt sich zum einen daran erkennen, dass die zum Nachweis dafür durchgeführte Referenzstudie in allen Aspekten modulare Komponenten, Vorgehensleitlinien und Analyseverfahren nutzen konnte, die dafür geeignet waren ohne spezifische Anpassungen vorzunehmen. Zum anderen konnte das Systemmodell der Referenzapplikation so entwickelt werden, dass es selbst keinerlei direkten Bezug zur Verkehrssimulationsanwendung (in diesem Fall VISSIM) nehmen musste.

Eine vollständig generische Anbindung an alle denkbaren Simulationsumgebungen benötigt dennoch einmalige spezifische Anpassungen an deren entsprechende spezifische Programmierschnittstellen. Diese müssen zu diesem Zweck benötigten Informationen und Zugriffsmöglichkeiten anbieten oder, wie etwa im Fall von Anwendungen mit offenem Quellcode, erzeugen lassen. Ist dies nicht der Fall, kann eine Anbindung an das vorgestellte Rahmenwerk nicht erfolgen. Allerdings ist eine solche Anwendung in dem Fall generell nicht zur Wirkungsanalyse extern angebundener Intelligenter Verkehrssysteme geeignet. Das Ergebnis dieser Forschungsarbeit wird dadurch somit nicht in Frage gestellt.

Die Referenzstudie ist nur ein exemplarischer Fall, der nicht alle Aspekte und Herausforderungen der Modellierung und Wirkungsanalyse Intelligenter Verkehrssysteme abdeckt. Jedoch zeigt sie die Zweckmäßigkeit der entwickelten Komponenten und kann auf eine große Zahl typischer Anwendungsfälle übertragen werden.

Es wäre denkbar gewesen, eine virtuelle Welt zu erschaffen, die lediglich die Erfordernisse einer effizienten Simulation erfüllt und die einen noch höheren Grad an Abstraktion erlaubt hätte. Allerdings hat sich gezeigt, dass Komponenten, die bei der Entwicklung realer Verkehrssysteme, wie etwa Positionsketten oder Speicherobjekte für Sensorinformationen sich gut auf virtuelle Abbildungen übertragen lassen. Somit vereinfachen sie eine Validierung und erhöhen gleichzeitig die Nachvollziehbarkeit seitens der Nutzer ohne dass wesentliche Einbußen im Hinblick auf die Laufzeit- und Speichereffizienz in Kauf genommen werden müssten.

Das bearbeitete Forschungsthema lässt sich in den Kontext einer umfassenden generischen Kopplung verschiedenster Modelle und Komponenten zur modellbasierten Analyse von

Wirkungen beeinflussender Maßnahmen auf den des Straßenverkehr einordnen. Das bedeutet, dass eine dieser Forschungsarbeit vergleichbare Modellierung von weiteren Komponenten, die für eine vollständig generische Simulation relevant sind, wie etwa Lichtsignalsteuerungen oder die Generierung virtueller Straßennetze, als Fortsetzung von Bedeutung wäre. Dies geht jedoch über die gestellte Forschungsfrage hinaus.

Aus der Gesamtbetrachtung dieses Bewertungskapitels lässt sich schließen, dass die an diese Arbeit gestellten Forschungsfragen in geeigneter Weise beantwortet werden konnten.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Rahmenwerk zur Modellierung von Intelligenten Verkehrssystemen entwickelt und vorgestellt. Bei diesen Systemen handelt es sich um dynamische und kooperative Anwendungen im Schnellverkehr, die moderne Informations- und Kommunikationstechnologien zur Beeinflussung des Verkehrs nutzen. Dazu gehören, neben anderen, die dynamische infrastrukturbasierte Verkehrsbeeinflussung oder auch kooperative fahrzeugseitige Assistenzfunktionen, die zur Effizienzverbesserung und der Erhöhung der Sicherheit im Verkehr beitragen sollen. Ziel der Arbeit war es, derartige Systeme strukturiert, umfassend, effizient und wissenschaftlich abgesichert nach wiederverwendbarem Muster auf ihre tatsächlichen Wirkungen im Verkehr unter verschiedenen Randbedingungen in einer virtuellen, jedoch realitätsnah konfigurierten Umgebung untersuchen zu können. Eine weitere Fragestellung betraf die Möglichkeit und Umsetzung einer modularen und generischen Anbindung entwickelter Systemmodelle an verschiedene Simulationswerkzeuge.

Der Modellierungsrahmen umfasst drei zentrale Elemente: Erstens ein Software-Framework zur Wiederverwendung und generischen Anbindung von Systemmodellen Intelligenter Verkehrssysteme an verschiedene Verkehrssimulationswerkzeuge. Zweitens einen methodischen Ablaufrahmen mit Vorgaben und Empfehlungen zum strukturierten Vorgehen bei der Modellbildung und der Modelloptimierung. Der Ablaufrahmen nutzt dabei etablierte Vorgehensweisen aus Entwicklungsprozessen im Software-Engineering sowie aus Leitfäden zur Planung und Durchführung von Wirkungsanalysestudien im Verkehrswesen. Der dritte Aspekt besteht aus einer Analysekomponente, die Sensitivitätsanalysen hinsichtlich der Systemparameter und verschiedener Szenarien zur Evaluierung von Verkehrswirkungen des entwickelten Systemmodells ermöglicht.

Schließlich wurde der dreiteilige Modellierungsrahmen anhand einer Referenzstudie auf seine Vollständigkeit, Nutzbarkeit und Korrektheit hin untersucht. Für die Referenzstudie wurde das kooperative hochautomatisierte Abstandshaltesystem *CACC (Cooperative Adaptive Cruise Control)*, das im Rahmen des PATH-Programms an der University of California in Berkeley entwickelt wurde, mithilfe des Modellierungsrahmens in ein Systemmodell umgesetzt. Anschließend konnte für dieses Modell eine umfassende Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden.

Es hat sich gezeigt, dass für das Referenzsystem eine strukturierte und, im Vergleich zu vorangehenden Untersuchungsstudien ohne Nutzung dieser Komponenten und der Systematik, sehr effiziente Modellbildung möglich war. Die zustandsbasierte Ablaufmodellierung erlaubte es dabei insbesondere die Komplexität der Systemdynamik intuitiv einschätzen zu können. Die durchgeführten Sensitivitätsanalysen lieferten für das Systemmodell vier zentrale Erkenntnisse: Die Untersuchung auf insensitive Modellparameter ergab, dass die

erste Iteration der Modellierung bereits keine unnötigen Parameter vorsah. Bei anderen Systemmodellen kann dies jedoch der Fall sein und die strukturelle Komplexität kann auf Basis eines solchen Ergebnisses reduziert werden.

Der zweite Ergebnisaspekt der Analysen betraf die Validierung des Modells. Die zentrale angestrebte Systemwirkung im Gesamtverkehr ist die Beeinflussung der zeitlichen Abstände zwischen den Fahrzeugen. Das Analyseergebnis hat gezeigt, dass die Variation des Parameters *angestrebte Zeitlücke* eine Änderung der tatsächlichen Zeitlücken aller Fahrzeuge in der erwarteten Tendenz bewirkt. Dies kann als Beitrag zur Validierung des Systemmodells gewertet werden. Im Zusammenhang mit der Ablaufbeschreibung im Modellierungsrahmen wurden weitere Möglichkeiten der Modellvalidierung für andere Anwendungen aufgezeigt. Des Weiteren konnten durch die Parametersensitivitätsanalysen Erkenntnisse gewonnen werden zur optimalen Ausgestaltung des Systems im Hinblick auf seine Wirkungen auf den Gesamtverkehr. Dies ist insbesondere dann interessant, wenn mithilfe des Modellierungsrahmens in neuartiges Verkehrssystem modelliert werden soll, das gezielt auf die Erhöhung von Verkehrseffizienz oder Verkehrssicherheit abzielt. Die Sensitivitätsanalyse der Systemparameter gibt in diesem Fall quantitativ Aufschluss über optimale Wertebereiche für die Belegung einzelner Systemparameter auf Basis eines Systemmodells, dass die wesentlichen Merkmale eines möglichen künftigen Verkehrssystems berücksichtigt.

Eine zusätzliche Sensitivitätsuntersuchung des Referenzsystems sah die Variation von Umgebungsvariablen - im Unterschied zu den zuvor betrachteten Systemparametern - vor, die zu Szenarien führten, die als vierten Aspekt der Analyseresultate Aufschlüsse über die Wirkung der Systemnutzung unter bestimmten Randbedingungen auf den Gesamtverkehr zulassen. Konkret bedeutet dies, dass beispielsweise erkennbar wurde, wie die Variation der Ausstattungsrate (Anteil an Fahrzeugen, die mit dem Referenzsystem ausgestattet sind, an der Gesamtzahl der Fahrzeuge im betrachteten Streckennetz) in verschiedenen Simulationsszenarien die Streckenkapazität durch Verschiebung der Zeitlücken potentiell erhöhen kann.

Studien dieser Art können mit der Unterstützung einer Analysekomponente, die im Software-Framework des Modellierungsrahmens vorgesehen ist, einheitlich und effizient konfiguriert, durchgeführt und deren Ergebnisse anschaulich aufbereitet werden.

In einer abschließenden Bewertung wurde zusammenfassend diskutiert, dass der Modellierungsrahmen für die Bildung und Optimierung eines Systemmodelles zum Referenzsystem in sinnvoller und gültiger Weise genutzt werden konnte. Es folgte die Feststellung, dass das Rahmenwerk ohne wesentliche Anpassungen übertragbar ist im Hinblick auf die Modellierung vergleichbarer Funktionalitäten im Schnellverkehr sowie auch auf deren generische Anbindung an andere Verkehrssimulationsanwendungen.

Der Modellierungsrahmen hat nach den beschriebenen Arbeiten einen Stand erreicht, in dem er zur Entwicklung von Systemmodellen einer Vielzahl an Anwendungen im Autobahnverkehr nutzbar ist. Dennoch bestehen verschiedene Möglichkeiten zur Erweiterung, um das Framework für weitere mögliche Analyseumgebungen nutzen zu können.

Technische und methodische Anpassungen wären notwendig bei der Verwendung des Ablaufes und der Softwarekomponenten für Applikationen im innerstädtischen Bereich, z. B. für intelligente adaptive Lichtsignalsteuerungen. Zu untersuchen wäre hierbei insbesondere die Frage, ob eine innerstädtische Kreuzungssituation vollständig durch die fahrzeugseitige Beeinflussung der in dieser Arbeit als zentrale Beeinflussungsgrößen identifizierten Stellgrößen Längsbeschleunigung, Fahrstreifenwechsel und Routenwahl geregelt werden könnte.

Interessant wäre, entsprechend der Ausführungen in Abschnitt 5.3.3, auch eine Anpassung der Schnittstellen zur Verknüpfung der Systemmodelle mit verschiedenen Arten von Simulatoren, wie etwa Fahrsimulatoren, zur direkten Ermittlung des relevanten Fahrerverhaltens als Reaktion der Fahrer auf eine Warnung oder Information, die durch ein passives Assistenz- oder Verkehrssystem ausgegeben wird.

Ein weiterer Aspekt, der bei der Weiterentwicklung des vorgestellten Ablaufrahmens zu erwägen wäre, ist die Berücksichtigung neuerer Erkenntnisse im Hinblick auf Vorgehensmodelle und Projektabläufe im Software-Engineering. Eine wichtige Entwicklung ist hier der verstärkte Fokus vieler Projekte auf agile Methoden, die auf Veränderungen im Projektablauf und hinsichtlich der Anforderungen flexibel reagieren können. Bei der Zusammenarbeit mehrerer Beteiligter an der Entwicklung von Systemmodellen komplexerer Verkehrssysteme sind solche agile Verfahren auch als Ergänzung zum eher statischen Prozessmodell in dieser Arbeit in Betracht zu ziehen.

Bei Betrachtung der zu verwendenden Technologien bei der Entwicklung und Simulation von Softwaremodellen Intelligenter Verkehrssysteme sind weitere Ansätze denkbar, die über die in dieser Arbeit entwickelten Konzepte hinausgehen. So kann etwa das modulare Framework noch offener und flexibler zugänglich gemacht werden, wenn beispielsweise Schnittstellen zu Simulationsanwendungen als netzweite Dienste zur Verfügung gestellt werden. Dadurch könnte eine ständige Verfügbarkeit einer Verkehrssimulation hergestellt und externe Systemmodelle dynamisch angekoppelt und simuliert werden. Dies setzt jedoch eine geeignete Serverinfrastruktur und gegebenenfalls ein geeignetes Lizenzmodell für proprietäre Simulationsanwendungen voraus.

Weiterhin kann unter Umständen eine weitere Erhöhung der Laufzeiteffizienz der mit dem Framework entwickelten Modelle erreicht werden, indem eine verstärkte Möglichkeit der

Parallelisierung durch Verteilung der Simulation auf mehrere Prozessoren oder verteilte Rechner zur Verfügung gestellt wird.

Abschließend soll an dieser Stelle erwähnt sein, dass der Modellierungsrahmen einen Beitrag leisten kann zur Standardisierung der Applikationsentwicklung im Bereich Intelligenter Verkehrssysteme. Während etwa für die physikalischen Schichten der Netzwerktechnologien im V2X-Umfeld sehr konkrete Standards, beispielsweise seitens der ETSI, bestehen, sind die Applikationsschichten bislang kaum standardisiert. Ein Rahmenwerk zur Modellentwicklung wie das hier beschriebene ist ein möglicher Schritt in eine solche Richtung.

A Anhang - Schnittstellenspezifikation

Auf den folgenden Seiten ist die die Struktur der Applikationskomponente des Softwareframeworks in Form von UML-Diagrammen dargestellt.

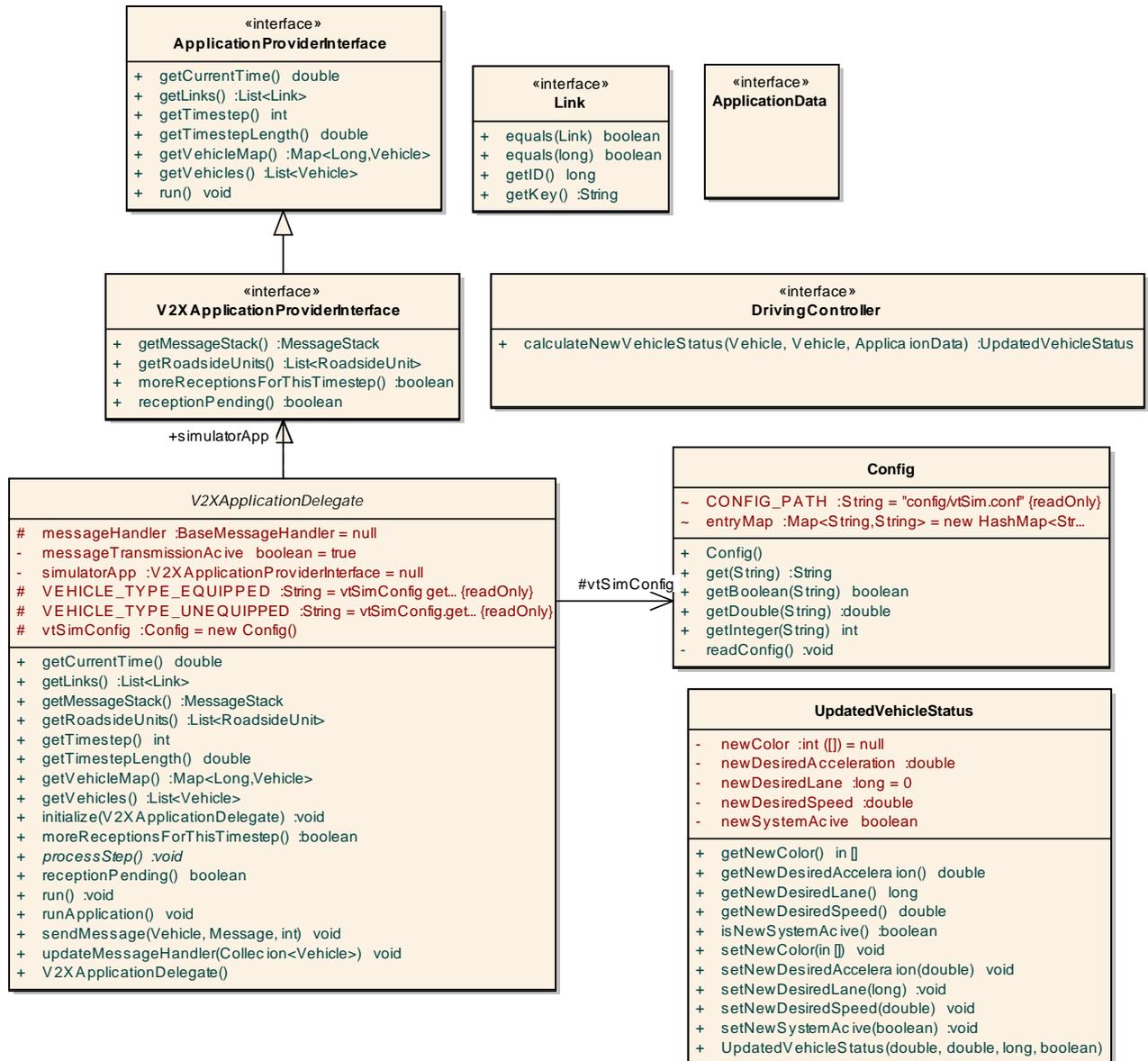


Bild A.1 UML-Klassendiagramm der Basisklassen in der Application-Komponente zur Implementierung von IVS-Anwendungsmodellen.



Bild A.2 UML-Klassendiagramm der erweiterten Klassen in der Application-Komponente zur Implementierung von IVS-Anwendungsmodellen.

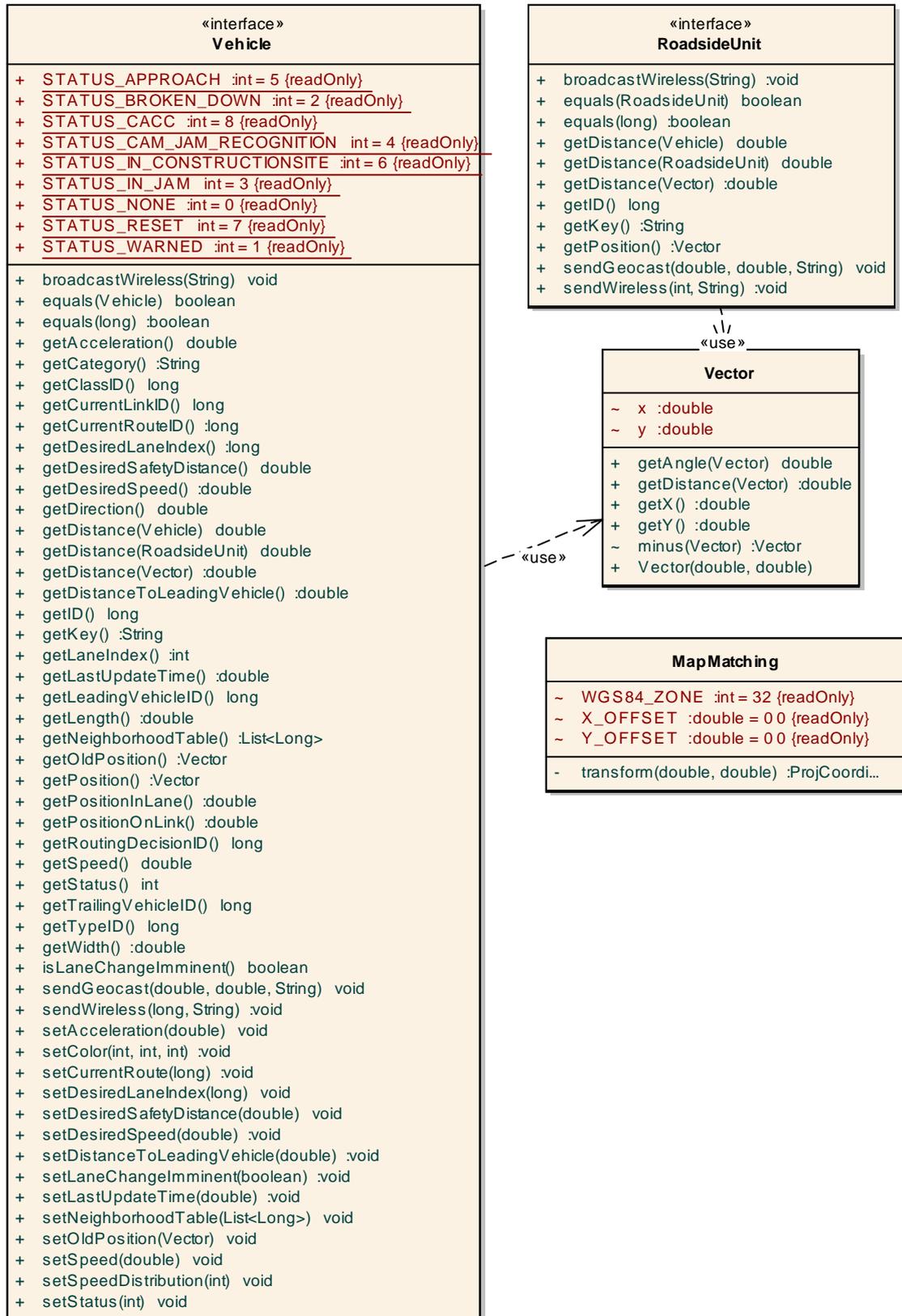


Bild A.3 UML-Klassendiagramm der erweiterten Klassen in der Application-Komponente zur Implementierung von IVS-Anwendungsmodellen.

B Anhang - Simulationskalibrierung

Code-Auszug B.1 zeigt einen Ausschnitt aus der VISSIM-Netzdatei, die zur Simulation der Referenzapplikation verwendet wurde. Der Auszug enthält die relevante Parametrierung des Fahrverhaltensmodells nach Wiedemann.

Listing B.1 Parameterierung des Fahrerverhaltens in PTV VISSIM.

```
FAHRVERHALTEN 2 NAME "Right-side rule (motorized)"
  SPURWECHSELVERHALTEN RECHTSFAHRGEBOT KOOPERATIV GESCHWINDIGKEIT 3.00
  KOLLISIONSZEIT 10.00
    T_DIFFUSION 60.00 MIN_SPW_LUECKE 0.20 FREIFAHRZEIT 11.00
    BMIN EIGENE MIN -1.00 ENTFERNUNG 50.00 MAX -1.00
      HINTERMANN MIN -2.00 ENTFERNUNG 50.00 MAX -2.00 LOOKAHEAD
FAHRZEUGFOLGEMODELL WIEDEMANN99
  ANZ_VM 2 VORAUSSCHAUWEITE MIN 0.00 MAX 250.00 ZURUECKSCHAUWEITE
  MIN 0.00 MAX 150.00
  AX_MITTEL 2.00 BX_ADD 2.00 BX_MULT 3.00
  CC0 1.50 CC1 1.30 CC2 4.00 CC3 -12.00 CC4 -0.25
  CC5 0.35 CC6 6.00 CC7 0.25 CC8 2.00 CC9 1.50
  NEW_CLOSEUP AX_STATIC 0.50
QUERVERHALTEN SPURMITTE
  UEBERHOLEN RECHTS FAHRZEUGKLASSEN
  UEBERHOLEN LINKS FAHRZEUGKLASSEN
  SEITENABSTAND DEFAULT DY_STAND 1.00 DY_50KMH 1.00
GELBVERHALTEN LAUF_PRUEFUNG
  GELB_ALPHA 1.59000000 GELB_BETA1 -0.26000000 GELB_BETA2 0.27000000
```

Literaturverzeichnis

- BARCELO, J. [2010]: Fundamentals of traffic simulation, Bd. 145 von International Series in Operations Research Management Science, Springer, New York [u.a.].
- BARCELO, J.; FERRER, J. L. und MONTERO, L. [1989]: AIMSUN: Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban Networks, Departamento de Estadística e Investigación Operativa - Facultad de Informática **1989**.
- BARR, R. und HAAS, Z. [2005]: JiST / SWANS - Java in Simulation Time / Scalable Wireless Ad hoc Network Simulator, Wireless Networks Laboratory, Cornell University. <http://jist.ece.cornell.edu> **2005**.
- BAST [1999]: Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ).
- BAUR, M.; FULLERTON, M. und BUSCH, F. [2010]: Realizing an Effective and Flexible ITS Evaluation Strategy through Modular and Multi-Scaled Traffic Simulation, IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine **2010**.
- BAUR, M.; PARK, B.; LEE, J.; SO, J. und FULLERTON, M. [2014]: Sensitivity Analysis of Message Reception Probability on Traffic related Impacts of a CACC System within the Traffic Simulation Framework vtSim, Proceedings of the Transportation Research Board Annual Meeting 2014.
- BAUR, M.; SCHIMANDL, F.; GABLONER, S.; MARGREITER, M. und HOFFMANN, S. [2012]: An integrated approach to the traffic efficiency impact evaluation of cooperative systems in FOTs and traffic simulation, in BMVIT (ed.), Proceedings ITS World Congress 2012, Wien, BMVIT.
- BELINOVA, Z.; BURES, P. und JESTY, P. [2010]: Intelligent Transport System Architecture Different Approaches and Future Trends, Data and Mobility, Bd. 81 von Advances in Intelligent and Soft Computing, Springer Berlin Heidelberg, S. 115–125.
- BEN-AKIVA, M.; BIERLAIRE, M.; KOUTSOPOULOS, H. und MISHALANI, R. [1998]: DynaMIT: a simulation-based system for traffic prediction, DACCORS Short Term Forecasting Workshop, The Netherlands.
- BMVBS [2012]: IVS Aktionsplan Straße: Koordinierte Weiterentwicklung bestehender und beschleunigte Einführung neuer Intelligenter Verkehrssysteme in Deutschland bis 2020.
- BOEHM, B. W. [1979]: Guidelines for Verifying and Validating Software Requirements and Design Specifications, in P. A. SAMET (ed.), Euro IFIP 79, North Holland, S. 711–719.
- BOLTZE, M.; WOLFERMANN, A. und SCHÄFER, P. [2006]: Leitfaden Verkehrstelematik, Hinweise zur Planung und Nutzung in Kommunen und Kreisen, Zentrum für integrierte Verkehrssysteme an der TU Darmstadt **2006**.
- BORTZ, J. und DÖRING, N. [2006]: Forschungsmethoden und Evaluation: für Human-und Sozialwissenschaftler, Springer.

- BRAUN, R.; BAUR, M.; MÜLLER, J.; SCHIMANDL, F.; HOFFMANN, S.; FULLERTON, M. und BUSCH, F. [2011]: Strategy to determine the effects of cooperative systems on traffic safety and efficiency, 8th ITS European Congress, Lyon.
- BRAUN, R.; MÄNNICKE, S. und WEICHENMEIER, F. [2005]: Anwendung und Bewertung eines Verfahrens zur netzweiten Offline-Optimierung der Lichtsignal-Koordinierung mittels genetischer Algorithmen, Tagungsband Verkehrswissenschaftliche Tage, Dresden **2005**.
- BRÜGGE, B. und DUTOIT, A. [2004]: Objektorientierte Softwaretechnik mit UML, Entwurfsmustern und Java, Informatik : Softwaretechnik, Pearson Studium, München and Boston [u.a.].
- BU, F.; TAN, H. und HUANG, J. [2010]: Design and field testing of a cooperative adaptive cruise control system, American Control Conference (ACC), 2010, S. 4616–4621.
- BULD, S.; HOFFMANN, S. und TOTZKE, I. UND ANDERE [2003]: Die Fahrsimulation als Methode bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen/Driving simulation as a method for developing driver assistance systems, VDI-Berichte **2003**(1745).
- BUNGARTZ, H.-J. [2009]: Modellbildung und Simulation: Eine anwendungsorientierte Einführung, eXamen.press, Springer, Berlin [u.a.].
- BUSCH, F. [2009]: Begleitforschung und Ergänzung des Merkblatts 'Ermittlung der Wirksamkeit von Verkehrsbeeinflussungsanlagen'.
- CAMPOLONGO, F.; CARIBONI, J.; SALTELLI, A. und SCHOUTENS, W. [2003]: Enhancing the Morris Method, Technometrics **2003**.
- COHEN, J. [1988]: Statistical power analysis for the behavioral sciences, 2. Aufl., L. Erlbaum Associates, Hillsdale and N.J.
- DETERING, S. [2011]: Kalibrierung und Validierung von Verkehrssimulationsmodellen zur Untersuchung von Verkehrsassistenzsystemen, Dissertation, Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.
- DRIVE C2X [2011 bis 2014]: DRIVE C2X - Accelerate cooperative mobility: Forschungsprojekt und zur Untersuchung kooperativer Systeme im Verkehr im europäischen Umfeld.
URL: <http://www.drive-c2x.eu>
- DRÖSCHEL, W. [2000]: Das V-Modell 97: Der Standard für die Entwicklung von IT-Systemen mit Anleitung für den Praxiseinsatz, Oldenbourg, München and Wien.
- ERKE, H. und GSTALTER, H. [1985]: Verkehrskonflikttechnik: Handbuch für die Durchführung und Auswertung von Erhebungen, Bd. 52, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven.
URL: <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=nbn:de:bvb:19-epub-2556-8>
- ETEMAD, A. [2014]: AdaptIVe (Automated Driving Applications & Technologies for Intelligent Vehicles).
URL: <http://www.imobilitysupport.eu/library/imobility-forum/working-groups/active/automation/workshops-3/1-oct-2013/2277-vra-presentation-08-adaptive-1-oct-2013/file>

- ETSI [2009]: ETSI ES 202 663 - Intelligent Transport Systems (ITS); European profile standard for the physical and medium access control layer of Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band.
- ETSI [2010]: ETSI 302 665 (V1. 1.1) - Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture, Intelligent Transport Systems (ITS) **2010**.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION [2009]: Intelligente Verkehrssysteme: Ein kluger Schachzug für Europa ; der IVS-Aktionsplan der Europäischen Kommission, febr. 2009 Aufl., Amt für Amtl. Veröff. der Europ. Gemeinschaften, Luxemburg.
- EUROPÄISCHES PARLAMENT [2010]: Richtlinie 2010/40/EU zum Rahmen für die Einführung intelligenter Verkehrssysteme im Straßenverkehr und für deren Schnittstellen zu anderen Verkehrsträgern.
- EVENDEN, G. [1990]: Cartographic projection procedures for the UNIX environment: A user's manual, United States Geological Survey.
- FEICHTINGER, G. und HARTL, R. [1986]: Optimale Kontrolle ökonomischer Prozesse: Anwendungen des Maximumprinzips in den Wirtschaftswissenschaften, W. de Gruyter, Berlin and New York.
- FELLENDORF, M. und VORTISCH, P. [2001]: Validation of the microscopic traffic flow model VISSIM in different real-world situations, National Research Council (US). Transportation Research Board. Meeting (80th: 2001: Washington, DC). Preprint CD-ROM.
- FGSV [1997]: Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen: Entwurf ; EWS ; Aktualisierung der RAS-W 86, Bd. 132,1 von FGSV, FGSV-Verl, Köln.
- FGSV [2006]: Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation: Grundlagen und Anwendung, Bd. 388 von FGSV, 2006 Aufl., FGSV-Verlag, Köln.
- FGSV [2007]: Hinweise zur Wirksamkeitsschätzung und Wirksamkeitsberechnung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen, Bd. 311 von FGSV W 1, 2007 Aufl., FGSV, Köln.
- FLÜCKIGER, M. und RAUTERBERG, M. [1995]: Komplexität und Messung von Komplexität, ETH Zürich-Institut für Arbeitspsychologie, Technical Report IfAP/ETH/CC-01/95 S. 4–8.
- FOX, J. [2008]: Applied regression analysis and generalized linear models, 2. Aufl., Sage, Los Angeles.
- GAMMA, E. [2012]: Design patterns: Elements of reusable object-oriented software, Addison-Wesley professional computing series, 40. Aufl., Addison-Wesley, Boston [u.a.].
- GASSER, T.; ARZT, C.; AYOUBI, M.; BARTELS, A.; BÜRKLE, L.; EIER, J.; FLEMISCH, F.; HÄCKER, D.; HESSE, T.; HUBER, W. und OTHERS [2012]: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Unterreihe Fahrzeugtechnik **2012**(83).

- GAUGEL, T.; SCHMIDT-EISENLOHR, F. und HARTENSTEIN, H. [2011]: Bericht über die Umsetzung von Simulationsmodellen für die Vehicle-to-X Communication im Rahmen des Projektes simTD.
- GAZIS, D. C.; HERMAN, R. und POTTS, R. [1959]: Car-following theory of steady-state traffic flow, *Operations Research* **7**(4): 499–505.
- GIPPS, P. [1981]: A behavioural car-following model for computer simulation, *Transportation Research Part B: Methodological* **15**(2): 105–111.
- GLÄSER, S.; SOMMER, C.; GEHLEN, G. und SORIES, S. [2008]: Cocar - Kooperative Fahrzeuganwendungen auf Mobilfunkbasis, *ATZelektronik* **3**(5): 26–31.
URL: <http://dx.doi.org/10.1007/BF03223926>
- GLASER, W. R.; WASCHULEWSKI, H. und SCHMID, D. [2005]: I-TSA-Ein standardisiertes Verfahren zur Bewertung der Auswirkungen von Fahrerinformations- und Fahrassistenzsystemen auf die Verkehrssicherheit, *VDI-Berichte* **2005**(1919).
- GUVENC, L.; UYGAN, I.; KAHRAMAN, K.; KARAAHMETOGLU, R.; ALTAY, I.; SENTÜRK, M.; EMIRLER, M.; KARCI, A.; GUVENC, A.; ALTUG, E. und OTHERS [2012]: Cooperative Adaptive Cruise Control implementation of team Mekar at the grand cooperative driving challenge, *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on* **13**(3): 1062–1074.
- HAKE, G.; GRÜNREICH, D. und MENG, L. [2002]: *Kartographie: Visualisierung raum-zeitlicher Informationen*, 8., vollständig neu bearbeitete und erw. Aufl., De Gruyter, Berlin.
- HARTENSTEIN, H. und LABERTEAUX, K. [2010]: *VANETs: Vehicular applications and inter-networking technologies*, Wiley, Chichester West Sussex U.K. and Hoboken NJ.
- HARTMANN, S. und BAILER-JONES, D. [2010]: Modelle, *Enzyklopädie Philosophie* **2**: 1627–1632.
- HEDDERICH, J. und SACHS, L. [2012]: *Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R*, 14., überarb. und erg. Aufl., Springer, Berlin and Heidelberg.
- HELBING, D. [1997]: *Verkehrsdynamik: Neue physikalische Modellierungskonzepte ; mit 6 Tabellen*, Springer, Berlin [u.a.].
- HENDERSON, T.; LACAGE, M.; RILEY, G.; DOWELL, C. und KOPENA, J. B. [2008]: Network simulations with the ns-3 simulator, *SIGCOMM demonstration* **2008**.
- HEROLD, H.; LURZ, B. und WOHLRAB, J. [2012]: *Grundlagen der Informatik*, Pearson, Higher Education.
- HILL, C.; DELUCA, C.; SUAREZ, M.; DA SILVA, A. und ANDERE [2004]: The architecture of the earth system modeling framework, *Computing in Science & Engineering* **6**(1): 18–28.
- HILLER, A.; HINSBERGER, A.; STRASSBERGER, M. und VERBURG, D. [2007]: Results from the project WILLWARN, 6th European Congress and Exhibition on Intelligent Transportation Systems and Services.

- HOFFMANN, J. [1998]: MATLAB und SIMULINK: Beispielorientierte Einführung in die Simulation dynamischer Systeme, Addison-Wesley, Bonn [etc.].
- HOFFMANN, S. [2013]: Mikroskopische Modellierung und Bewertung von verkehrssicherheitskritischen Situationen, Dissertation, Technische Universität München.
- HOLZAPFEL, H. und PROTZE, K. (eds) [2013]: Verkehrsplanung und Landschaft: Tradition und Perspektiven, Kassel Univ. Press, Kassel.
- HOPCROFT, J.; MOTWANI, R. und ULLMAN, J. [2002]: Einführung in die Automatentheorie, formale Sprachen und Komplexitätstheorie, Informatik, 2., überarb. Aufl., Pearson Studium, München [u.a.].
- HOYER, R. [2012]: Verkehrliche Potenziale des vorausschauenden Fahrens an kooperativen Lichtsignalanlagen. 5, Tagung Fahrerassistenz München .
- IHAKA, R. und GENTLEMAN, R. [1996]: R: a language for data analysis and graphics, Journal of computational and graphical statistics **5**(3): 299–314.
- JIANG, D.; TALIWAL, V.; MEIER, A.; HOLFELDER, W. und HERRTWICH, R. [2006]: Design of 5.9 GHz DSRC-based vehicular safety communication, IEEE Wireless Communications **13**(5): 36–43.
- KILLAT, M. [2009]: The impact of inter-vehicle communication on vehicular traffic, KIT Scientific Publ, Karlsruhe.
- KILLAT, M.; SCHMIDT-EISENLOHR, F.; HARTENSTEIN, H.; RÖSSEL, C.; VORTISCH, P.; ASSENMACHER, S. und BUSCH, F. [2007]: Enabling efficient and accurate large-scale simulations of VANETs for vehicular traffic management, Vehicular Ad Hoc Networks, ACM, S. 29–38.
- KINDEL, O. und FRIEDRICH, M. [2009]: Softwareentwicklung mit AUTOSAR: Grundlagen, Engineering, Management in der Praxis, 1 Aufl., dpunkt.verl, Heidelberg.
- KRAJZEWICZ, D. [2009]: Kombination von taktischen und strategischen Einflüssen in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation, in T. JÜRGENSOHN (ed.), Fahrermodellierung in Wissenschaft und Wirtschaft, Bd. Nr. 28 von Fortschritt-Berichte VDI / 22 / VDI, VDI-Verl., Düsseldorf.
- KRAJZEWICZ, D.; HERTKORN, G.; RÖSSEL, C. und WAGNER, P. [2002]: SUMO (Simulation of Urban MObility), Proc. of the 4th Middle East Symposium on Simulation and Modelling, S. 183–187.
- KRAUSS, S. [1998]: Microscopic modeling of traffic flow: Investigation of collision free vehicle dynamics, Dissertation, Universität zu Köln.
- KUMAR, V.; LIN, L.; KRAJZEWICZ, D.; HRIZI, F.; MARTINEZ, O.; GOZALVEZ, J. und BAUZA, R. [2010]: iTETRIS: Adaptation of ITS Technologies for Large Scale Integrated Simulation, Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring), 2010 IEEE 71st, S. 1–5.

- KUNERT, U.; RADKE, S.; CHLOND, B. und KAGERBAUER, M. [2012]: Auto-Mobilität: Fahrleistungen steigen 2011 weiter, DIW-Wochenbericht **79**(47): 3–14.
URL: <http://hdl.handle.net/10419/67569>
- LAQUAI, F.; DUSCHL, M. und RIGOLL, G. [2011]: Impact and modeling of driver behavior due to cooperative assistance systems, Proceedings of the Third international conference on Digital human modeling, ICDHM'11, Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg, S. 473–482.
URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2028841.2028899>
- LEI, C.; VAN EENENNAAM, E.; W., KLEIN; PLOEG, J.; KARAGIANNIS, G. und HEIJENK, G. [2012]: Evaluation of CACC string stability using SUMO, Simulink, and OMNeT++, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking **2012**(1): 116.
- LH MÜNCHEN [2004]: Wie das Licht in die Stadt kommt: 275 Jahre Straßenbeleuchtung in München.
- LIGHTHILL, M. J. und WHITHAM, G. B. [1955]: On Kinematic Waves. II. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads, Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences **229**(1178): 317–345.
- LORENZ, A. (ed.) [2008]: Fahrerassistenzsysteme und intelligente Verkehrssteuerung: Soziologische Analysen hoch automatisierter Verkehrssysteme, Bd. Nr. 21 von Soziologische Arbeitspapiere, TU Dortmund.
- LUDMANN, J.; DIEKAMP, R. und LERNER, G. [1992]: PELOPS Ein Programmsystem zur Untersuchung neuer Längsdynamikkonzepte im Verkehrsfluß, VDI-Berichte **1007**.
- MANNSTETTEN, D.; BENGLER, K.; BUSCH, F.; FÄRBER, B.; LEHSING, C.; NEUKUM, A.; PETERMANN-STOCK, I. und SCHENDZIELORZ, T. [2013]: “UR:BAN MV” – a German project focusing on human factors to increase traffic safety in urban areas“, Proceedings of the 20th ITS World Congress 2013.
- MARSDEN, G.; McDONALD, M. und BRACKSTONE, M. [2001]: Towards an understanding of adaptive cruise control, Transportation Research Part C: Emerging Technologies **9**(1): 33–51.
- MEHTA, M. [2001]: Design and implementation of an interface for the integration of DynaMIT with the traffic management center, Dissertation, Massachusetts Institute of Technology.
- METACRS [2009]: Proj4J: Java library to transform point coordinates from one geographic coordinate system to another, including datum transformations.
URL: <http://trac.osgeo.org/proj4j/>
- MOLTENBREY, M. [2009]: Multimodale parallele Simulation des Verkehrsflusses in großen Netzen, Dissertation, Technical University Munich.
URL: <http://mediatum2.ub.tum.de/doc/682215/document.pdf>
- MORRIS, M.D. [1991]: Factorial sampling plans for preliminary computational experiments, Technometrics **33**(2): 161–174.

- MOUSTAFA, H. und ZHANG, Y. [2009]: Vehicular networks: Techniques, standards, and applications, CRC Press, Boca Raton.
- NAGEL, K. und SCHRECKENBERG, M. [1992]: A cellular automaton model for freeway traffic, *Journal de Physique I* **2**(12): 2221–2229.
- OLSHANSKY, D. [2007]: Java Plugin Framework (JPF) - System Overview.
URL: <http://jpf.sourceforge.net/about.html>
- OMG [2001]: Unified Modelling language (UML) 1.4 Specification.
- OMG [2011]: OMG Unified Modeling Language (OMG UML), Superstructure Specification (Version 2.4.1).
- OTTERBACH, R. und SCHÜTTE, F. [2004]: Effiziente Funktions- und Software-Entwicklung für mechatronische Systeme im Automobil: dSAPCE, 2. Paderborner Workshop "Intelligente Mechatronische Systeme".
- PARK, B.; CHEN, Y. und HOURDOS, J. [2011]: Opportunities for Preventing Rear-End Crashes: Findings from the Analysis of Actual Freeway Crash Data, *Journal of Transportation Safety & Security* **3**(2): 95–107.
- PARK, B. und WON, J. [2006]: Microscopic Simulation Model Calibration and Validation Handbook, VTRC (Series), Virginia Transportation Research Council.
URL: <http://books.google.de/books?id=r2dRNwAACAAJ>
- PARK, H.; MILOSLAVOV, A.; LEE, J.; VEERARAGHAVAN, M.; PARK, B. und SMITH, B. [2011a]: Integrated Traffic-Communication Simulation Evaluation Environment for IntelliDrive Applications Using SAE J2735 Message Sets, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* **2243**(-1): 117–126.
- PASSIOURA, J. [1996]: Simulation models: science, snake oil, education, or engineering?, *Agronomy Journal* **88**(5): 690–694.
- PIETRUSZKA, W. D. [2006]: Modellbildung, Berechnung und Simulation, MATLAB und Simulink in der Ingenieurpraxis **2006**.
- PLOEG, J.; SCHEEPERS, B.T.M.; VAN NUNEN, E.; VAN DE WOUW, N. und NIJMEIJER, H. [2011]: Design and experimental evaluation of Cooperative adaptive Cruise Control, *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2011 14th International IEEE Conference on*, S. 260–265.
- POLIZEI BAYERN [2012]: Verkehrszentrale München.
URL: <http://www.polizei.bayern.de/muenchen/verkehr/index.html/2143>
- PROTZMANN, R.; SCHÜNEMANN, B. und RADUSCH, I. [2010]: The influences of communication models on the simulated effectiveness of V2X applications, *Vehicular Networking Conference (VNC), 2010 IEEE*, S. 102–109.

- PUNZO, V. und CIUFFO, B. [2009]: How Parameters of Microscopic Traffic Flow Models Relate to Traffic Dynamics in Simulation, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* **2124**(-1): 249–256.
- RANEY, B.; CETIN, N.; VÖLLMY, A.; VRTIC, M.; AXHAUSEN, K. und NAGEL, K. [2003]: An agent-based microsimulation model of Swiss travel: First results, *Networks and Spatial Economics* **3**(1): 23–41.
- RAUSCH, A. und BROY, M. [2006]: *Das V-Modell XT: Grundlagen, Erfahrungen und Werkzeuge*, 1. Aufl., Dpunkt, Heidelberg.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM [2013]: *JRI - Java/R Interface*.
URL: <http://rforge.net/JRI/index.html>
- REUSCHEL, A. [1950]: Fahrzeugbewegungen in der Kolonne bei gleichförmig beschleunigtem oder verzögertem Leitfahrzeug, *Zeitschrift des Oesterreichischen Ingenieur- und Architekten-Vereines* **1950**(95(9)): 59–62.
- RIEMANN, R.; BAUR, M. und FULLERTON, M. [2012]: Parameter sensitivity analysis of a cooperative system by means of microscopic traffic simulation, *ITSC*.
- RIJKSWATERSTAAT; BMVBS und BMVIT [2013]: *Cooperative ITS Corridor - Joint deployment*.
URL: <http://www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Strasse/flyer-eurokorridor-cooperative-its-corridor-in-deutsch.pdf>
- RITA [2011]: *Intelligent Transportation Systems (ITS) Standards Program Strategic Plan for 2011–2014*.
URL: http://www.its.dot.gov/standards_strategic_plan/stds_strat_plan.pdf
- ROYCE, W. [1970]: Managing the development of large software systems: concepts and techniques, *Proc. IEEE WESTCON*, Los Angeles S. 1–9.
URL: <http://www.cs.umd.edu/class/spring2003/cmsc838p/Process/waterfall.pdf>
- SAFESPOT [2006 bis 2009]: *SAFESPOT Integrated Project: Cooperative vehicles and road infrastructure for road safety*.
URL: <http://www.safespot-eu.org>
- SALTELLI, A. [2007]: *Sensitivity analysis in practice: A guide to assessing scientific models*, repr Aufl., John Wiley & Sons, Chichester.
- SALTELLI, A.; CHAN, K. und SCOTT, M. [2000]: *Sensitivity analysis*, Bd. 134, Wiley New York.
- SCHICK, B.; HENNING, J.; WURSTER, U. und KLEIN-RIDDER, B. [2008]: Simulationsmethoden zur Evaluierung und Verifizierung von Funktion, Güte und Sicherheit von Fahrerassistenzsystemen im durchgängigen MIL-, SIL- und HIL-Prozess, 3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz **2008**.

- SCHICK, P. [2003]: Einfluss von Streckenbeeinflussungsanlagen auf die Kapazität von Autobahnabschnitten sowie die Stabilität des Verkehrsflusses, Veröffentlichungen aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart **2003**.
- SCHIMANDL, F.; BAUR, M.; HOFFMANN, S.; GABLONER, S. und MARGREITER, M. [2013]: Effects of Cooperative Systems on Traffic Safety and Efficiency – Results of the German simTD-Project, in F. BUSCH (ed.), mobil.TUM 2013.
- SCHNABEL, W. und LOHSE, D. [2011]: Grundlagen der Strassenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung, 3. Aufl., Beuth and Kirschbaum, Berlin and Bonn.
- SCHÜNEMANN, B. [2011]: Simulation runtime infrastructure VSimRTI: An assessment tool to design smart traffic management systems, *Computer Networks* **55**(14): 3189–3198.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128611001605>
- SCHWIEGER, V. [2005]: Nicht-lineare Sensitivitätsanalyse gezeigt an Beispielen zu bewegten Objekten, Bd. 581 von Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften : Reihe C, Dissertationen, Verl. der Bayerischen Akad. der Wiss., München.
- SCORE@F [2008 bis 2010]: SCORE@F (Système Coopératif Routier Expérimental @ France).
URL: <https://project.inria.fr/scoref/>
- SHLADOVER, S.; NOWAKOWSKI, C.; CODY, D.; BU, F.; O'CONNELL, J.; SPRING, J.; DICKEY, S. und NELSON, D. [2009]: Effects of Cooperative Adaptive Cruise Control on traffic flow: testing drivers' choices of following distances, California PATH Program, Institute of Transportation Studies, University of California at Berkeley.
- SIMTD [2008 bis 2013]: Sichere Intelligente Mobilität – Testfeld Deutschland: Forschungsprojekt und Feldversuch zur Entwicklung und Analyse kooperativer Systeme im Verkehr.
URL: <http://www.simTD.de>
- SIMTD KONSORTIUM [2009]: Deliverable-D21.2: Konsolidierter Systemarchitekturentwurf.
- SPARMANN, U. [1978]: Spurwechselforgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen, Bundesministerium für Verkehr, A. S., Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik **1978**(263).
- SWAT, M.; THOMAS, G.; BELMONTE, J.; SHIRINIFARD, A.; HMELJAK, D. und GLAZIER, J. [2012]: Chapter 13 - Multi-Scale Modeling of Tissues Using CompuCell3D, in ANAND R. ASTHAGIRI und ADAM P. ARKIN (eds), *Computational Methods in Cell Biology*, Bd. 110 von *Methods in Cell Biology*, Academic Press, S. 325–366.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123884039000138>
- TEICHGRÄBER, W. [1983]: Die Bedeutung der Geschwindigkeit für die Verkehrssicherheit, *Z VERKEHRSSICHERHEIT* **29**(2).
- TODOSIEV, E.P. [1963]: The Action Point Model of the Driver-vehicle System, Ohio State University.
URL: <http://books.google.de/books?id=pXSPnQEACAAJ>

- TREIBER, M. und KESTING, A. [2010]: Verkehrsdynamik und -simulation: Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik, Springer-Lehrbuch, Springer, Berlin u.a.
- VAN AREM, B.; VAN DRIEL, C. und VISSER, R. [2006]: The Impact of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic-Flow Characteristics, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 7(4): 429–436.
- VARGA, A. und OTHERS [2001]: The OMNeT++ discrete event simulation system, Proceedings of the European Simulation Multiconference (ESM'2001), Bd. 9, S. 185.
- VS AG [2004]: VS-PLUS Produkteblatt.
URL: http://www.rkag.ch/pdf/VS-PLUS_Produnkteblatt.pdf
- WANG, S. und LIN, C. [2008]: NCTUns 5.0: A network simulator for IEEE 802.11 (p) and 1609 wireless vehicular network researches, Vehicular Technology Conference, 2008. VTC 2008-Fall. IEEE 68th, S. 1–2.
- WEGENER, I. [2003]: Komplexitätstheorie: Grenzen der Effizienz von Algorithmen, Springer-Lehrbuch, Springer, Berlin [u.a.].
- WEISS, C. [2011]: V2X communication in Europe – From research projects towards standardization and field testing of vehicle communication technology, Computer Networks 55(14): 3103–3119.
- WIECHMANN, T. und BEIER, M. [2005]: Erratum zu: Evaluationen in der Regionalentwicklung, Raumforschung und Raumordnung 63(1): 84.
- WIEDEMANN, M. [1991]: Die Sensitivitätsanalyse in der Meßtechnik der Wärmewellen zur Bestimmung thermischer Parameter von Mikrostrukturen, 21]: [Fortschrittberichte VDI, VDI-Verlag.
URL: <http://books.google.de/books?id=mSuwPgAACAAJ>
- WIEDEMANN, R. [1974]: Simulation des Straßenverkehrsflusses, Bd. 8 von Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Univ., Inst. für Verkehrswesen, Karlsruhe.
- WIEDEMANN, R. und SCHWERDTFEGGER, T. [1987]: Makroskopisches Simulationsmodell für Schnellstraßennetze mit Berücksichtigung von Einzelfahrzeugen (DYNEMO), Bd. 500 von Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesmin. f. Verkehr, Abt. Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg.
- WILTSCHKO, T. [2004]: Sichere Information durch infrastrukturgestützte Fahrerassistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten, Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart.
URL: <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2004/1929>
- WINNER, H.; HAKULI, S. und WOLF, G. [2012]: Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, Handbuch Fahrerassistenzsysteme .

- WISCHOFF, L.; EBNER, A.; ROHLING, H.; LOTT, M. und HALFMANN, R. [2003]: SOTIS - a self-organizing traffic information system, Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Spring. The 57th IEEE Semiannual, Bd. 4, S. 2442–2446 vol.4.
- WOLF, F.; RAUCHHAUPT, L. und SCHADE, J. [2012]: Aktuelle Entwicklungen im Bereich kooperativer Verkehrssysteme, at - Automatisierungstechnik **60**(4): 213–224.
- YANG, Q. und KOUTSOPOULOS, H. [1996]: A microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems, Transportation Research Part C: Emerging Technologies **4**(3): 113–129.
- ZIMOLONG, B. [1982]: Verkehrskonflikttechnik: Grundlagen und Anwendungsbeispiele, Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr, Bundesanst. für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung.

Abkürzungsverzeichnis

sim ^{TD}	Sichere Intelligente Mobilität - Testfeld Deutschland
AdaptIVe	Automated Driving Applications & Technologies for Intelligent Vehicles
CACC	Cooperative Adaptive Cruise Control
GPS	Global Positioning System
HiL	Hardware-in-the-Loop
HMI	Human-Machine-Interface
LSA	Lichtsignalanlage
SiL	Software-in-the-Loop
SUMO	Simulation of Urban MObility
UML	Unified Modelling Language
V2I	Vehicle-to-Infrastructure-Kommunikation
V2X	Vehicle-to-X-Kommunikation
VCOM	Vehicluar COMMunications
VISSIM	Verkehr In Städten SIMulation

Glossar

AdaptIVe

Automated Driving Applications & Technologies for Intelligent Vehicles. EU-Projekt zur Untersuchung von automatisierten und autonomen Fahrfunktionen.

Adaptive Cruise Control (ACC)

Automatisches Abstandshaltesystem in Oberklassefahrzeugen, basierend auf Sensortechnologien (Radar oder Lidar) am Fahrzeug.

Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC)

Kommunikationsbasiertes System der hochautomatisierten Fahrzeugführung zur Bildung von harmonisierten Fahrzeugpuls unter Nutzung von *Vehicle-to-X-Kommunikation*.

Hardware-in-the-Loop

Hardware-in-the-Loop (HiL) bezeichnet die Einbindung realer Hardwarekomponenten in eine Simulationsumgebung zur Untersuchung spezifischer Wirkungen.

Human-Machine-Interface (HMI)

Schnittstelle zwischen Fahrer und Fahrzeug in Form eines Displays zur Anzeige von Informationen und Warnungen.

Intelligente Verkehrssysteme

Software oder Hardware-Anwendung im Umfeld des Straßenverkehrs, das mit Mitteln der Elektro- und Informationstechnik den Verkehr steuert.

Lichtsignalanlage

Eine *Lichtsignalanlage* (LSA) regelt den Verkehr an einem Knotenpunkt. Die LSA besteht aus Signalgebern und einem LSA-Steuergerät.

sim^{TD}

sim^{TD} steht für Sichere Intelligente Mobilität - Testfeld Deutschland. Ziel dieses Kooperationsprojektes war es innerhalb von fünf Jahren die Wirksamkeit der *Vehicle-to-X-Kommunikation* in einem Feldversuch nachzuweisen. Dazu wurden die Ergebnisse aus verschiedenen Projekten zusammengeführt und weiterentwickelt. Im September 2008 wurde das Projekt von 18 Partnern aus der Automobil- und Telekommunikationsindustrie sowie öffentlichen Einrichtungen und der Wissenschaft gestartet. Im Jahr 2012 fand zur Untersuchung der Technologie ein Feldversuch mit 120 Fahrzeugen statt. Parallel dazu wurden die sim^{TD}-Anwendungen in einem Simulationslabor untersucht. Gefördert und unterstützt wurde das Projekt von den Bundesministerien für Wirtschaft und Technologie, Bildung und Forschung sowie Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.

Software-in-the-Loop

Software-in-the-Loop (SiL) bezeichnet die Einbindung realer Softwarekomponenten in eine Simulationsumgebung zur Untersuchung spezifischer Wirkungen.

Unified Modelling Language (UML)

Grafische Beschreibungssprache aus dem Software-Engineering zur Visualisierung von Strukturen und Abläufen in Softwarearchitekturen.

Vehicle-to-Infrastructure-Kommunikation

Drahtlose Kommunikation zwischen Fahrzeugen und der Verkehrsinfrastruktur.

Vehicle-to-Vehicle-Kommunikation

Drahtlose Kommunikation zwischen Fahrzeugen und anderen Fahrzeugen.

Vehicle-to-X-Kommunikation

Drahtlose Kommunikation zwischen Fahrzeugen und anderen Fahrzeugen oder Fahrzeugen und der Verkehrsinfrastruktur. Sammelbegriff für *Vehicle-to-Vehicle-Kommunikation* und *Vehicle-to-Infrastructure-Kommunikation*.

Vehicular COMMunications (VCOM)

Probabilistisches Modell zur Berechnung von Empfangswahrscheinlichkeiten im Bereich der Verkehrssimulation von *Vehicle-to-X-Kommunikation*-Anwendungen.

VISSIM

VISSIM ist eine mikroskopische Verkehrssimulation, die von der PTV AG entwickelt wird.

Abbildungsverzeichnis

Bild 1.1	Aufbau der Arbeit	4
Bild 2.1	Aspekte der Kommunikation im Umfeld kooperativer Verkehrssysteme. Darstellung des Lehrstuhls für Verkehrstechnik der Technischen Universität München.....	9
Bild 2.2	Vorhersagefehler in Modellen bei steigender Komplexität (aus PAS-SIOURA [1996]).	13
Bild 2.3	Schematische Darstellung eines typischen Modellbildungsprozesses in der Wissenschaft. Darstellung von HOFFMANN [2013].	14
Bild 2.4	Schema einer Sensitivitätsanalyse. Darstellung in Anlehnung an SALTELLI ET AL. [2000].....	16
Bild 2.5	Zeit-Weg-Diagramm mit mehreren Fahrzeugtrajektorien. Eigene Darstellung in Anlehnung an [SCHNABEL UND LOHSE 2011].	20
Bild 2.6	Interaktionsmodell nach Wiedemann unter Berücksichtigung von Wahrnehmungsschwellen (aus [WIEDEMANN 1974]).	24
Bild 2.7	VCOM-Modell zur Ermittlung von Wahrscheinlichkeiten für den V2X-Nachrichteneingang in Verkehrssimulationen (aus GAUGEL ET AL. [2011]).	30
Bild 2.8	Nettoabstand zwischen zwei Folgefahrzeugen. Eigene Darstellung.....	33
Bild 2.9	Schematische Trajektorie eines Beispielfahrzeugs aus einer Menge von Fahrzeugen. Eigene Darstellung.	35
Bild 2.10	Schematischer Verlauf der Geschwindigkeit des Einzelfahrzeugs. Eigene Darstellung.	36
Bild 2.11	Schematische Darstellung mehrerer Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten und des Mittelwertes dieser Mittelwerte. Eigene Darstellung.....	36
Bild 2.12	Zusammenspiel der Versuchsumgebungen in sim^{TD} . Eigene Darstellung....	37
Bild 2.13	Beispielhafte Darstellung eines Zustandsautomaten zur Modellierung eines Fahrkartenautomaten. Eigene Darstellung.....	39
Bild 2.14	Das V-Modell der Softwaretechnik. Eigene Darstellung, angelehnt an [BRÜGGE UND DUTOIT 2004].	41
Bild 3.1	Ablaufdarstellung des entwickelten Modellierungsprozesses	48
Bild 3.2	Schematische Darstellung des Ablaufs einer Multiskalensimulation. Eigene Darstellung.	51
Bild 3.3	Schematische Darstellung der Architektur des Simulationsframeworks vtSim. Veröffentlicht u. a. von BAUR ET AL. [2014].	53
Bild 3.4	Darstellung der Zusammenhänge der relevanten Komponenten des Frameworks. Eigene Darstellung.	54
Bild 3.5	Gesamtarchitektur des technischen Modellierungsrahmens im UML-Klassendiagramm	55
Bild 3.6	Schematische Darstellung einer Zusammenhangsliste durch Verkettung nachfolgender Fahrzeuge. Eigene Darstellung.	58
Bild 3.7	Schematische Darstellung aller Fahrzeuge in der Umgebungstabelle (U) für ein ausgewähltes Fahrzeug (E). Eigene Darstellung.....	58

Bild 3.8	Schematische Darstellung einer Positionskette und eines rechteckigen Relevanzbereiches einer Fahrereinformation, die sich auf ein Ereignis an der Referenzposition bezieht, entlang eines Simulationsnetzes. Eigene Darstellung basierend auf einer Netzansicht aus PTV Vision VISSIM.	60
Bild 3.9	Darstellung verschiedener Funktionen zur Illustration der Konfigurationsmöglichkeiten für die Sensitivitätsanalysen der Qualität der V2X-Nachrichtenübertragung. Abwandlung der Darstellung aus [GAUGEL ET AL. 2011].	62
Bild 3.10	Darstellung der notwendigen Koordinatentransformation von einem geodätischen Weltsystem in ein planares kartesisches Koordinatensystem für einzelnen Anwendungen. Eigene Darstellung.	63
Bild 3.11	Struktur der generischen Anbindung von Systemmodellen an konkrete Simulationsanwendungen mittels Delegation der Aufrufe an entsprechende Schnittstellenadapter.	67
Bild 3.12	Verlauf der mittleren Geschwindigkeit entlang eines Streckenabschnitts in vier Szenarien mit verschiedenen Ausstattungsdaten der V2X-Applikation Elektronisches Bremslicht.	69
Bild 3.13	Referenzstreckenausschnitt (durch rote vertikale Balken rechts unten markiert) als Kartenausschnitt in der OpenStreetMap-Ansicht.	71
Bild 3.14	Referenzstreckenausschnitt mit Zufluss- (blau) und Validierungsquerschnitt (rot) als Netzdarstellung in PTV Vision VISSIM 5.40.	71
Bild 3.15	Validierung des Verkehrsflusses am Querschnitt A661/17OFN. Eigene Darstellung.	72
Bild 3.16	Darstellung des Ablaufs zur Auswahl der zu nutzenden statistischen Tests innerhalb des Statistikmoduls. Eigene Darstellung.	75
Bild 3.17	Schematische Darstellung der Verkehrsbeeinflussung durch ein modelliertes kooperatives Verkehrssystem. Die Komponenten des Systemmodells sind grün markiert. Eigene Darstellung.	82
Bild 3.18	Darstellung der zurückgelegten Strecke über die Zeit bei konstanter Beschleunigung für verschiedene Beschleunigungswerte. Eigene Darstellung.	92
Bild 3.19	Zeitliche Abgrenzung von Simulationszeit, Vorlaufzeit und Untersuchungszeit. Quelle: [FGSV 2006].	93
Bild 3.20	Ausprägung der Beeinflussung durch ein Verkehrssystem und Signifikanz der Wirkungsaussage im Gesamtverkehr in Abhängigkeit des Auswertungsbereiches. Schemadarstellung, nicht maßstabsgetreu. Eigene Darstellung.	95
Bild 3.21	Darstellung der Systemausgabe (virtuelle Fahrerwarnungen) einer Warnung vor Stauenden in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit und des Ereignisses (Position des Stauendes). Eigene Darstellung.	102
Bild 4.1	Schematische Darstellung eines ACC-Fahrzeugs (blau markiert) und des detektierten, direkt vorausfahrendes Fahrzeugs (orange markiert). Eigene Darstellung.	106
Bild 4.2	Illustration der Pulkbildung durch das CACC-System und die entsprechenden Systemzustände. Eigene Darstellung.	109

Abbildungsverzeichnis	175
<hr/>	
Bild 4.3	UML-Klassenmodell der CACC-Applikation. Eigene Darstellung..... 110
Bild 4.4	Illustration der Pulkbildung durch das CACC-System und die entsprechenden Systemzustände. Eigene Darstellung..... 114
Bild 4.5	Zustandsautomat für das CACC-Systemmodell. Eigene Darstellung. 114
Bild 4.6	Vergleich der mittleren Zeitlücken als Ergebnis verschiedener Parameterkonfigurationen für die <i>Zielzeitlücke</i> (tht_c) von CACC-aktivierten Fahrzeugen. 126
Bild 4.7	Vergleich der Zeitlückenverteilungen (Histogramm) als Ergebnis verschiedener Parameterkonfigurationen für den Parameter <i>Zielzeitlücke</i> (tht_c) von CACC-aktivierten Fahrzeugen. 127
Bild 4.8	Vergleich der Zeitlückenverteilungen (Histogramm) als Ergebnis verschiedener Parameterkonfigurationen für den Parameter <i>Beschleunigungszeit</i> (t_a) von CACC-aktivierten Fahrzeugen. 129
Bild 4.9	Vergleich der Mittelwerte der Einzelfahrzeuggeschwindigkeit als Ergebnis verschiedener Parameterkonfigurationen für den Parameter <i>Beschleunigungszeit</i> (t_a) beim Aufschließen von CACC-aktivierten Fahrzeugen zu einem CACC-Pulk. 131
Bild 4.10	Vergleich der relativen Verteilung kritischer Situationen als Ergebnis verschiedener Parameterkonfigurationen für den Parameter <i>Beschleunigungszeit</i> (t_a) von CACC-aktivierten Fahrzeugen..... 133
Bild 4.11	Vergleich der Anteile kritischer Situationen als Ergebnis verschiedener Parameterkonfigurationen für den Parameter <i>Beschleunigung zum Aufschließen auf CACC-Pulk</i> (a_{dd}) von CACC-aktivierten Fahrzeugen. 133
Bild 4.12	Vergleich der mittleren Fahrzeuggeschwindigkeiten als Ergebnis verschiedener Parameterkonfigurationen für den Parameter <i>Beschleunigung zum Aufschließen auf CACC-Pulk</i> (a_{dd}) von CACC-aktivierten Fahrzeugen. 134
Bild 4.13	Vergleich der Verteilung der CACC-Zustände (Histogramm) als Ergebnis verschiedener Ausprägungen für die V2X-Kommunikationsreichweite von CACC-aktivierten Fahrzeugen..... 136
Bild 4.14	Vergleich der mittleren Zeitlücken als Ergebnis verschiedener Ausstattungsraten und CACC-Ausprägungen..... 137
Bild A.1	UML-Klassendiagramm der Basisklassen in der Application-Komponente zur Implementierung von IVS-Anwendungsmodellen..... 151
Bild A.2	UML-Klassendiagramm der erweiterten Klassen in der Application-Komponente zur Implementierung von IVS-Anwendungsmodellen..... 152
Bild A.3	UML-Klassendiagramm der erweiterten Klassen in der Application-Komponente zur Implementierung von IVS-Anwendungsmodellen..... 153

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1	Ausgewählte Beispiele für Intelligente Verkehrssysteme auf Autobahnen.	7
Tabelle 2.2	Ebenen der Fahrzeugautomatisierung. In Anlehnung an die Definitionen der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) in [GASSER ET AL. 2012]	11
Tabelle 2.3	Wirkebenen der verkehrsbeeinflussenden Parameter.....	11
Tabelle 2.4	MARZ - Verkehrsstufen (aus [BAST 1999]).	22
Tabelle 3.1	Zentrale Komponenten des Modellierungsrahmens	47
Tabelle 3.2	Mögliche Einordnung des Modellierungsrahmens in gängige Architekturebenen für IVS.....	52
Tabelle 3.3	Statistische Tests, die im Statistikmodul integriert sind.	76
Tabelle 3.4	Vorgeschlagene Kenngrößen zur Wirkungsermittlung - Verkehrseffizienz	79
Tabelle 3.5	Vorgeschlagene Kenngrößen zur Wirkungsermittlung - Verkehrssicherheit	79
Tabelle 3.6	Empfohlene Datenstrukturen zur Speicherung von relevanten Objekten für die Modellierung von Intelligenten Verkehrssystemen.	81
Tabelle 3.7	Beispiel für eine Codierung verschiedener Systemempfehlungen an einzelne Fahrer.	84
Tabelle 3.8	Zustandstypen für die Ablaufmodellierung.....	89
Tabelle 3.9	Skalen der Modellierung von Verkehrsbeeinflussung.	91
Tabelle 3.10	Mögliche Kombinationen und zeitliche Auflösungen zwischen Modellierungs- und Analyseskalen.	92
Tabelle 3.11	Vier zentrale Ziele der Sensitivitätsanalysen.	96
Tabelle 3.12	Drei Arten der Darstellung für Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen.	99
Tabelle 4.1	Aufstellung aller Systemparameter des CACC-Systems.	116
Tabelle 4.2	Aufstellung aller Systemparameter des CACC-Systems mit den für die Analysen genutzten Wertebelegungen.....	117
Tabelle 4.3	Beeinflusste Parameter in Abhängigkeit vom aktuellen Ausgangszustand des Systems.	117
Tabelle 4.4	Ziele der Sensitivitätsanalysen und die Zuordnung zur jeweils durchgeführten Untersuchungsstudie.....	121
Tabelle 4.5	Szenarien zur Untersuchung der Wirkungen der Nutzung des CACC-Systems auf den Verkehr unter verschiedenen Randbedingungen.	123
Tabelle 4.6	Ermittlung der Anzahl der benötigten Simulationsläufe mittels Berechnung des erreichbaren Konfidenzintervalls (CI_e) für die Parametervariation der Zielzeitlücke für CACC-Fahrzeuge (tht_c).....	124
Tabelle 4.7	Einfluss des Parameters <i>Zielzeitlücke CACC</i> (tht_c) auf die mittlere Zeitlücke aller Fahrzeuge.	128
Tabelle 4.8	Einfluss des Parameters <i>Beschleunigungszeit</i> (t_a) auf die mittlere Zeitlücke aller Fahrzeuge.	130
Tabelle 4.9	Einfluss des Parameters <i>Beschleunigungszeit</i> (t_a) auf die mittlere Geschwindigkeit aller Fahrzeuge.	132
Tabelle 4.10	Einfluss des Parameters <i>Beschleunigung zum Aufschließen auf CACC-Pulk</i> (a_{dd}) auf die mittlere Geschwindigkeit aller Fahrzeuge.	135