

Messung und Analyse an verkehrstelematischen Systemen

am Beispiel Floating Car Data

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

zur Erlangung des Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation von

Dipl.-Ing. Dieter C. Lampl

geboren in Gmunden, Österreich

2009

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich

Koreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Fritz Busch

Tag der Promotion: 8. Jänner 2009

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen eines dreijährigen Projektes bei der zentralen Forschung und Vorausbildung der Robert Bosch GmbH in Hildesheim unter der wissenschaftlichen Betreuung von Professor Dr.-Ing. Bernhard Friedrich, finanziert durch ein Marie Curie Early Stage Stipendium des fünften Rahmenprogramms. Diese Kombination von wissenschaftlich hochwertigem Austausch und Praxisbezug durch einen großen Automobilzulieferer ergab eine für die Domäne Verkehrstelematik sehr günstige Konstellation.

Herrn Professor Dr.-Ing. Bernhard Friedrich möchte ich besonders, vor allem aber für die vielen Diskussionen danken, die für mich jedes Mal sowohl inspirierend als auch motivierend waren und mir halfen, das sehr breit angelegte Thema sinnvoll einzugrenzen. Auch für seine Geduld während der dem Projekt nachfolgenden, nebenberuflichen Schreibphase bin ich ihm sehr dankbar.

Für die Übernahme des Koreferats und sein motivierendes Interesse am Thema der Arbeit möchte ich Professor Dr.-Ing. Fritz Busch danken. Ebenso danke ich ihm für seine Unterstützung in der kritischen Endphase vor Abgabe der Promotionschrift.

Als Betreuer auf Seite der Robert Bosch GmbH möchte ich besonders Herrn Dr. Andreas Engelsberg danken, der mir sowohl den nötigen Freiraum zur Findung eines eigenen Weges durch das breit angelegte Thema als auch bei der Auswahl der Mitarbeiter für das Projekt verschafft hat. Herrn Dr. Volker Skwarek danke ich für das geistige Sparring in der Anfangsphase des Projekts. Ohne die Hilfe meiner Mitarbeiter wäre die Umsetzung der vorliegenden Arbeit im Projekt nicht möglich gewesen, ich möchte mich daher ganz besonders bei Frau Chen Jin, Herrn Christoph Doehring, Herrn Thorsten Neumann und Herrn Christoph Kelm bedanken. Mit ihnen standen hochmotivierte und kompetente Mitarbeiter zur Verfügung, mit denen es nicht nur spannend war, zusammenzuarbeiten, sondern auch großen Spaß gemacht hat. Besonders möchte ich auch Herrn Jens Fänger danken, mit dem ich mich aufgrund seiner hohen Fachkompetenz und seiner Persönlichkeit sehr gerne ausgetauscht habe. Als Kollegen im Promotionsvorhaben möchte ich Herrn Sven Baselau für seine immerwährende Diskussionsbereitschaft danken. Diese beiden seien stellvertretend für alle anderen Personen genannt, die mich unterstützt haben.

Meinen Eltern gilt ganz besonderer Dank, dafür dass sie mir die für wissenschaftliche Arbeit nötige Neugier mit auf den Weg gegeben haben und in schwierigen Zeiten immer zur Seite gestanden sind. Für letzteres möchte ich auch meinem Bruder danken.

Mein herzlichster Dank gilt meiner Partnerin Julia Pulverer, die mich mit ihrer Liebe und ihrem Zuspruch während der gesamten Zeit des Projekts und der Schreibphase maßgeblich unterstützt hat. Dafür, dass sie wie kaum jemand anderer mit mir die Höhen und Tiefen dieser Zeit durchgestanden hat und trotzdem bei Erwähnung der Doktorarbeit immer noch nicht schreiend das Weite sucht, bin ich ihr aus ganzem Herzen dankbar.

Hildesheim, im Juni 2008

Dieter C. Lampl

Schlagworte

Messung und Analyse, Verkehrstelematik, virtuelle Realität

Keywords

Measurement and Analysis, Traffic Telematics, Virtual Reality

Kurzfassung

Die Verkehrstelematik ist eine interdisziplinäre Domäne zwischen Straßenverkehrstechnik, Telekommunikation und Informatik, der ein großes Potential als Alternative oder Erweiterung bestehender Systeme zugeschrieben wird. Die Applikationen der Verkehrstelematik sind sehr unterschiedlich und reichen etwa im Kontext von Floating Car Data von der Erfassung und Rekonstruktion einer netzweiten Verkehrslage unter Verwendung zentraler Kommunikation von Fahrzeugen zu einer Zentrale bis zur lokalen Gefahrenwarnung, bei der Fahrzeuge straßenverkehrliches Gefahrenpotential mithilfe ihrer bordeigenen Sensorik erheben, um die gewonnenen Informationen zur Warnung an andere Fahrzeuge über Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation zu verteilen. Wird hinterfragt, wie das eingangs erwähnte Potential gemessen oder im Variantenvergleich in Relation gesetzt werden kann, sind über qualitative Aussagen hinausgehend kaum belastbare Informationen zu finden. Dies galt besonders, wenn Aussagen über einen Zusammenhang der Qualität des Ergebnisses von der Menge der am System beteiligten Fahrzeuge gesucht sind. Diesem Informationsmangel an belastbaren Daten durch Definition einer dafür geeigneten Methodik und Bereitstellung eines die Daten erhebenden Rahmenwerks abzuhelpfen, war Zielsetzung der vorliegenden Arbeit. Darüber hinaus sollte die Methodik anhand eines konkreten Anwendungsfalls validiert werden.

Da einer der wesentlichen Gründe für diesen Informationsmangel durch die Tatsache gegeben war, dass in einem konventionellen Feldversuch mit nur wenigen teilnehmenden Fahrzeugen zwar die technische Machbarkeit prinzipiell gezeigt werden kann, aufgrund ökonomischer Restriktionen jedoch keine beliebig große Menge an am verkehrstelematischen System teilnehmenden Fahrzeugen mit den notwendigen Umrüstungen versehen werden können, wurde eine Möglichkeit geschaffen, durch Zuhilfenahme von mikroskopischer Simulation beliebige Mengen von teilnehmenden Fahrzeugen bereitzustellen. Unter dieser Prämisse wurde eine allgemein für verkehrstelematische Systeme konzipierte Methodik für die Messung und Analyse in der Verkehrstelematik entwickelt. Als Grundgedanke diente dabei der Begriff des Prüfstands, auf dem verkehrstelematische Systeme durch die Verwendung von beliebigen Messinstrumenten vermessen werden können. Diese Methodik wurde zunächst in einem für verkehrstelematische Systeme allgemein gehaltenen Rahmenwerk umgesetzt, das verkehrstelematischer Prüfstand genannt wurde und die Festlegung von Messszenarien sowie den zugehörigen Messinstrumenten gestattet. In den verkehrstelematischen Prüfstand wurde dann der Anwendungsfall Verkehrsinformation mit Floating Car Data integriert und vermessen. Für die Vermessung des Anwendungsfalls wurden Qualitätskennzahlen definiert, die sich des Konzepts des Level of Service bedienen.

Die derart im verkehrstelematischen Prüfstand erfassten Szenarien stellten umfangreiches Datenmaterial zur Verfügung, das aus nachvollziehbaren Messszenarien abgeleitet werden konnte und für beliebige Mengen von teilnehmenden Fahrzeugen die jeweils für das Szenario definierten Messreihen aufzeichnete. Die Aufzeichnung beschränkte sich dabei nicht nur auf technische Kenngrößen, sondern berücksichtigte auch wirtschaftliche Daten wie die zur Erzeugung eines konkreten Ergebnisses notwendigen Kostenmengen, sowie durch Festlegung der zugehörigen Stückkosten und Kostenträger die resultierenden Kosten. In weiterer Folge waren Analysen dieser belastbaren Daten möglich, die zu weiteren notwendigen Messungen führen konnten. Das eingangs genannte Potential kann dadurch reproduzierbar definiert, gemessen und analysiert werden.

Abstract

Traffic Telematics is an interdisciplinary domain in the fields of traffic research, telecommunications and computer science. Great potential is being assigned to this application, either as a substitute or an extension to existing systems. The applications vary significantly, e.g. from the reconstruction of traffic information in central communication scenarios from vehicles to a service center to the generation of local danger warnings, where vehicles generate the information based on the available data in the vehicle in order to distribute these information via adhoc-communication to other vehicles. When questioning, how the potential stated in the beginning can be measured or set in relation to other traffic telematics systems, almost no quantitative data can be found. This is explicitly true, when the data is requested in relation to the number of participating vehicles. It is the goal of this dissertation to provide a methodology and a suitable framework to generate these data sets. Furthermore the application of a use case was demanded to verify the methodology.

One of the reasons of that can be found in the fact, that in conventional field trials monetary restrictions lead to the lack of equipped vehicles for the data generation. The methodology and the framework integrated therefore the possibility to use microscopic simulation to access arbitrary numbers of vehicles. Based on that premise a general methodology for the measurement and analysis of traffic telematics systems was developed, which should provide the possibility to include arbitrary metrics for measurement. The methodology was first implemented as the mentioned framework, which was designed for the usage of arbitrary traffic telematics systems and measurement instruments based on concrete measurement scenarios. After that it was applied for the use case for generating traffic information with floating car data systems. For the measurement quality indices were defined, which were based on the level of service concept.

As a result a significant amount of data was generated, which was directly deducted from the defined measurement scenarios and could provide data for arbitrary amounts of participating vehicles. These data sets were not just restricted to the technical dimension, but also included the economic dimension. Cost units were generated and could be transformed into real costs by application of a cost structure. As next steps detailed analyses in the technical and the economic dimensions could be performed. With these reliable data sets the potential mentioned in the beginning could be reproducibly measured and analysed.

1	<u>EINLEITUNG</u>	1
2	<u>STAND DER TECHNIK.....</u>	2
2.1	VERKEHRSTELEMATIK	2
2.2	FLOATING CAR DATA	2
2.2.1	HISTORIE.....	3
2.2.2	GEMEINSAMES PRINZIP DER FCD-VERFAHREN	3
2.2.2.1	Kommunikation.....	4
2.2.2.2	Zielanwendungen.....	6
2.2.2.3	Einsatzgebiet.....	7
2.2.3	VARIANTEN VON FCD-VERFAHREN.....	7
2.2.3.1	Extended Floating Car Data	8
2.2.3.2	City-FCD.....	16
2.2.3.3	Frequenzdomänenverfahren	19
2.2.3.4	Self Organizing Traffic Information System.....	26
2.2.3.5	Taxi-FCD	30
2.2.3.6	Weitere Verfahrensvarianten	31
2.2.4	ANALYSE DER VERFAHRENSVARIANTEN	33
2.2.4.1	Methodik	33
2.2.4.2	Implementierungsabhängige Umsetzung.....	35
2.2.4.3	Fazit.....	36
3	<u>METHODIK DER MESSUNG UND ANALYSE IN DER VERKEHRSTELEMATIK</u>	38
3.1	THEORIE DER MESSUNG.....	38
3.2	VERKEHRSTELEMATISCHER PRÜFSTAND	43
3.2.1	DATENQUELLE	46
3.2.2	FAHRZEUGSTEUERUNG.....	46
3.2.3	VERKEHRSTELEMATIKSIMULATOR	47
3.2.3.1	Basiskomponenten und abgeleitete Komponenten	48
3.2.3.2	Beziehungen zwischen den Basiskomponenten	49
3.2.4	METRIKEN	51
3.2.5	KALIBRIERUNG IM RAHMEN DER KONFIGURATION	52
3.2.5.1	Kalibrierung der Fahrzeugsteuerung und der Datenquelle.....	53
3.2.5.2	Kalibrierung des Verkehrstelematiksimulator.....	53
3.3	SZENARIENBASIERTE SIMULATION	55
3.3.1	KOMBINATIONSEBENEN.....	55
3.3.1.1	Szenario	57
3.3.1.2	Szenarioklasse.....	58
3.3.1.3	Messaufbau	60
3.3.2	KOMPONENTENERZEUGUNG.....	62
3.3.3	ZEITLICHER ABLAUF	63
3.3.3.1	Anfang des Messdurchgangs.....	64

3.3.3.2	Zeitschritt.....	64
3.3.3.3	Ende des Messdurchgangs	64
3.4	DATENBANK.....	64
3.4.1	KONFIGURATION	65
3.4.1.1	Kombinationsebene Messaufbau	66
3.4.1.2	Kombinationsebene Szenarioklasse.....	67
3.4.1.3	Kombinationsebene Szenario	68
3.4.2	MESSWERTE	69
3.5	ANALYSE IN DER VERKEHRSTELEMATIK	70
3.5.1	ZIELANWENDUNGSABHÄNGIGE ANALYSE.....	70
3.5.2	SENSITIVITÄTSANALYSE.....	71
3.6	REGELKREISE	72
3.6.1.1	Regelkreis der Messung.....	72
3.6.1.2	Regelkreis der Kosten	73
3.7	ANWENDUNGSFALLUNABHÄNGIGE UMSETZUNG DER METHODIK	73
3.7.1	FAHRZEUGSTEUERUNG UND DATENQUELLE.....	74
3.7.2	VERKEHRSTELEMATIKSIMULATOR UND METRIKEN	77
3.7.3	DATENBANK.....	79
3.7.4	ANALYSEINSTRUMENTE.....	79
4	<u>ANWENDUNGSFALL VERKEHRSINFORMATION MIT FLOATING CAR DATA.....</u>	80
4.1	ZIELANWENDUNG.....	80
4.2	UNTERSUCHTE FLOATING CAR DATA VERFAHREN	80
4.2.1	FREQUENZDOMÄNENVERFAHREN.....	80
4.2.2	DURCHSCHNITTSGESCHWINDIGKEITSVERFAHREN	82
4.2.2.1	Verfahrensbeschreibung.....	82
4.2.2.2	Profil	83
4.2.3	KOMMUNIKATIONSSTRUKTUR.....	83
4.3	VERKEHRSNETZDATEN.....	84
4.4	KONFIGURATIONEN	86
4.4.1	MESSAUFBAUTEN	86
4.4.1.1	Hauptuntersuchung.....	87
4.4.1.2	Sensitivitätsanalysen	87
4.4.1.3	Metriken	90
4.4.1.4	Vergleichbarkeit der Verfahren	99
4.4.2	SZENARIOKLASSEN	105
4.4.3	SZENARIEN	105
4.5	ERGEBNISSE	107
4.5.1	HAUPTUNTERSUCHUNG	107
4.5.1.1	Maximal erreichbare und erreichte Ausstattungsrate des geforderten Fahrzeugtyps	107
4.5.1.2	Minimum, Durchschnitt und Maximum der Qualitätskennzahlen.....	108
4.5.1.3	Qualitätskennzahlen Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren, zentrale Kommunikation	108
4.5.1.4	Qualitätskennzahlen Frequenzdomänenverfahren, zentrale Kommunikation	113
4.5.1.5	Qualitätskennzahlen Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren über WLAN	114
4.5.1.6	Qualitätskennzahlen Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren über UTRA TDD.....	116
4.5.1.7	Verkehrsnetzabdeckung.....	116

4.5.1.8	Kostenmengen	117
4.5.2	SENSITIVITÄTSANALYSEN	119
4.5.2.1	Zufallsstartzahl	119
4.5.2.2	Simulationsdauer	126
4.5.2.3	Abtastintervall	132
4.5.2.4	Verkehrsnachfrage	135
5	<u>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</u>	139
6	<u>QUELLENNACHWEIS</u>	142
7	<u>ANHANG</u>	147
7.1	BESCHREIBUNG DER DATENBANKTABELLEN	147
7.1.1	KONFIGURATION	147
7.2	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	152

1 Einleitung

Die Welt der verkehrstelematischen Applikationen stellt sich als eine heterogene Landschaft aus unterschiedlichen Verfahrensansätzen mit verschiedenen Anwendungsgebieten dar. Floating Car Data Verfahren sind im verkehrlichen Kontext bekannte Vertreter dieser Klasse, die sich zum Ziel gesetzt haben, verkehrs- oder sicherheitsrelevante Daten aufzubereiten und zur Verfügung zu stellen. Besonders im Straßenverkehrswesen geschah dies in dem Bestreben, aufwändige und kostenintensive, lokale Infrastruktur zur Erhebung von Verkehrsdaten zu ersetzen oder zu ergänzen, um Kosten zu sparen, die Qualität der Verkehrsdaten zu erhöhen oder mit der Verkehrsdatenerfassung in Bereiche vorzudringen, für die mit lokaler Infrastruktur keine Daten erhoben werden können. Da verkehrstelematischen Applikationen ein hohes Potential dafür nachgesagt wird, befindet sich die Entwicklung dieser großteils in privatwirtschaftlicher Hand, womit die monetären Interessen an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben sollen.

Als Abnehmer der erzeugten Produkte – Verkehrsinformationen oder sicherheitsrelevante Informationen – stehen sowohl private Endkunden, datenaufbereitende Unternehmen, aber auch die öffentliche Hand prinzipiell zur Verfügung – wobei diese Liste nicht den Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Jede der genannten Gruppen hat wiederum unterschiedliche Interessen und damit Anforderungen an die erzeugten Informationen. Der Endkunde etwa möchte Verkehrsinformation zeitlich möglichst aktuell und in einer hohen Qualität, die ihm persönliche Vorteile während seiner Fahrt verschaffen und das im besten Fall ohne dafür bezahlen zu müssen. Unternehmen müssen sich auf die Rentabilität ihrer Wertschöpfungskette konzentrieren und einen geeigneten Kompromiss zwischen den technischen Aufwendungen und den dafür entstehenden Kosten finden. Die öffentliche Hand wiederum ist daran interessiert, die Verkehrsflüsse insgesamt gesehen optimal abzuwickeln und die Verkehrsanlagen bestmöglich auszulasten.

Diese Anforderungen in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht sind meist umgekehrt proportional zueinander, womit jede Interessensgruppe bestrebt sein wird, ihr eigenes Optimum darin zu finden. In Summe entsteht eine nicht-triviale Kette an Abhängigkeiten der einzelnen Interessensgruppen zueinander, sodass verkehrstelematische Systeme im Allgemeinen und Floating Car Data Systeme im Speziellen am besten im Gesamtkontext betrachtet werden sollten.

Die vorliegende Arbeit soll dazu einen Beitrag liefern. Die Grundlagen dafür wurden im Rahmen eines dreijährigen Projekts mit insgesamt fünf Mitarbeitern bei der Firma Robert Bosch GmbH, finanziert durch die Europäische Union in Form eines Marie-Curie-Stipendiums durchgeführt. Aufgrund der daraus resultierenden zeitlichen und budgetären Restriktionen wurde der Schwerpunkt auf die Messung in der Verkehrstelematik und die Schaffung der dafür benötigten theoretischen Grundlagen als auch deren Umsetzung gelegt.

2 Stand der Technik

Welche Ansätze im Bereich der Floating Car Data Systeme existieren, ihre Funktionsweise und wie unterschiedlich sie sich ausprägen, wird in diesem Abschnitt dargelegt. Als Konsequenz dieser Verschiedenartigkeit drängt sich die Frage nach den Gemeinsamkeiten auf. Welche davon über die betrachteten Varianten feststellbar sind und welche Verfahrensbestandteile variantenspezifisch bleiben, wird in einer anschließenden Analyse gegenübergestellt.

2.1 Verkehrstelematik

Telematik ist ein Kunstwort und setzt sich aus den beiden Begriffen *Telekommunikation* und *Informatik* zusammen. Sie ist „...ein Forschungs- und Entwicklungsbereich, der sich mit der Verbindung von *Telekommunikation* und *Informatik* befasst. Darunter fallen etwa in Netzstrukturen integrierte *Informationssysteme*, z.B. *Verkehrsleitsysteme*...“ [BIB06].

Trotz dieser bereits umfassenden Definition hat sich für die verkehrliche Präzisierung der Telematik zusätzlich der Begriff *Verkehrstelematik* als Teildisziplin der Telematik etabliert. Er „... bedeutet den Einsatz von *Telematik* im *Verkehrswesen*“ und „umschreibt ... [somit] alles, was mit *Fahrzeugen*, *ihren Insassen*, *dem Versand und Empfang*, *der Bearbeitung und Darstellung von Daten in einem Kraftfahrzeug zu tun hat*. ...“ [WIK06].

Als bekannter Vertreter verkehrstelematischer Applikationen gelten Floating Car Data Systeme, die aufgrund der Komplexität der zugrunde liegenden Datenverarbeitung, ihrer nicht-trivialen Verteilung auf die beteiligten Systemkomponenten und der systemimmanenten Notwendigkeit zur Verwendung von Kommunikationsstrukturen als repräsentativer Vertreter der verkehrstelematischen Applikationen betrachtet und im nächsten Abschnitt vertieft vorgestellt werden.

2.2 Floating Car Data

Der Grundgedanke von Floating Car Data (FCD) besteht darin, im Straßenverkehrsstrom mitfließende Fahrzeuge als mobile Messsonden zu verwenden, die Daten über das Verkehrsgeschehen erfassen, in dem sie sich aktuell befinden. Aus diesen Daten versuchen FCD-Verfahren, das Verkehrsgeschehen zu rekonstruieren.

Nach [BIB06] definiert sich Straßenverkehr „im weiteren Sinn [als] die *Benutzung öffentlicher Straßen durch alle Verkehrsteilnehmer*, im engeren Sinn nur durch *Kraftfahrzeuge*“. Betrachtet man den Straßenverkehr im engeren Sinn also als Summe der sich im Verkehr bewegenden Fahrzeuge, so steht mit FCD eine Methode zur Verfügung, Teile des Straßenverkehrs ohne Umwege über Messanlagen am Straßenrand direkt zu messen. Für den Maximalfall, dass alle Fahrzeuge als Sonden zur Verfügung stünden, läge in der gewählten Betrachtungsweise des Straßenverkehrs vollständige Information über das Verkehrsgeschehen vor.

Synonym zum Begriff Floating Car Data können die Bezeichnungen Probe Vehicle Data oder Probe Car Data verwendet werden. In dieser Arbeit wird durchgängig der Begriff Floating Car Data, bzw. FCD verwendet.

2.2.1 Historie

Die Idee des FCD-Verfahrens wurde erstmalig 1954 unter dem Namen „Moving Observer Method“ erwähnt [WAR54]. In einem Fahrzeug wurde manuell die Anzahl der entgegenkommenden, überholenden und überholten Fahrzeuge gezählt. Bei bekannter Durchschnittsgeschwindigkeit, Länge des vom Observer-Fahrzeug befahrenen Straßenstückes und der dafür benötigten Zeit konnte so auf die Verkehrsstärke rückgerechnet werden¹. Die Motivation war, für ländliche Gebiete mit geringem Verkehrsaufkommen eine Alternative zur stationären Messung der Verkehrsstärke zu finden. Zwar hatte diese Methode die Zielsetzung, die makroskopische Verkehrskenngröße Verkehrsstärke zu ermitteln, der Grundgedanke, Fahrzeuge für verkehrsmesstechnische Zwecke einzusetzen, wurde allerdings hier bereits beschrieben.

Die Zunahme des Elektronik- und Softwareanteils in modernen Kraftfahrzeugen hat dazu geführt, dass der unpraktikabel wirkende, manuelle Datenerfassungsansatz der Moving Observer Method inzwischen automatisiert werden konnte und damit für eine flächendeckende Verkehrsdatenerfassung interessant wird. Abbildung 1 zeigt beispielhaft eine solche fahrzeugseitig verfügbare Sensorik, die eine intelligente Erkennung von verschiedensten Ereignissen und Zuständen ermöglicht.



Abbildung 1: Beispielhafte Fahrzeugsensorik [BMW99]

2.2.2 Gemeinsames Prinzip der FCD-Verfahren

Allen Verfahren gemein ist ein mehrstufiger Datenverarbeitungsprozess, welcher in Abbildung 2 bildlich dargestellt ist. Er beginnt im Kraftfahrzeug – in diesem Zusammenhang auch floating car genannt – mit Auswahl der Datenbasis aus dem verfügbaren Angebot. Die Datenbasis kann je nach verwendetem FCD-Verfahren unterschiedlich ausfallen. Diese Rohdaten werden dann abhängig von der im Verfahren verwendeten fahrzeugseitigen Datenverarbeitung in Zwischengrößen transformiert und an den Empfänger kommuniziert. Die empfängerseitige Datenverarbeitung verarbeitet die empfangenen Zwischengrößen aller beteiligten Fahrzeuge

¹ [MUL02], S.3

schließlich zum Ergebnis der Zielanwendung des jeweiligen FCD-Verfahrens. Als Randbedingung ist jedes Verfahren für ein bestimmtes Einsatzgebiet konzipiert.

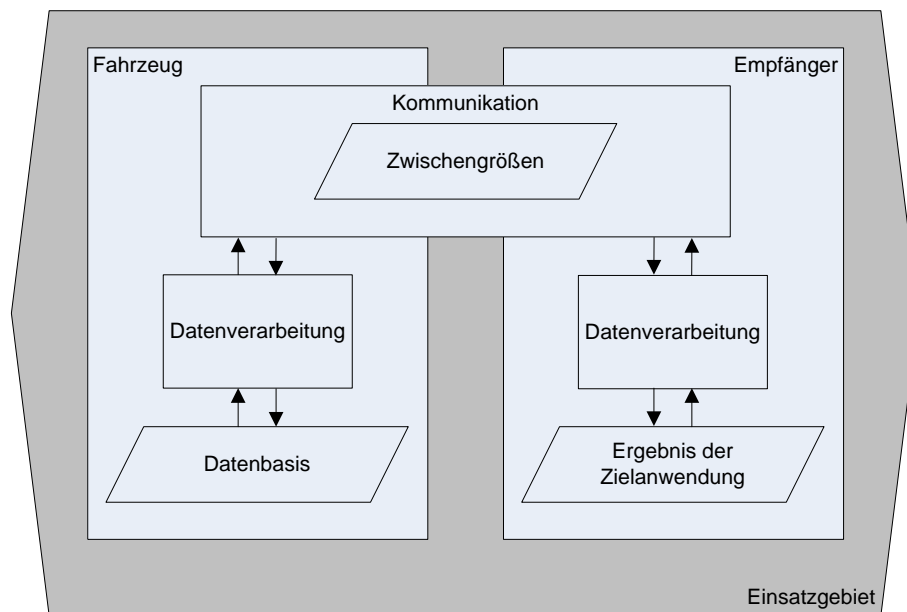


Abbildung 2: Gemeinsamer Datenverarbeitungsprozess FCD Verfahren²

Das Ergebnis des gesamten Datenverarbeitungsprozesses hängt direkt von der **Ausstattungsrate** ab. Die Ausstattungsrate beschreibt den Anteil der an dem Prozess beteiligten Fahrzeuge, bezogen auf das Gesamtkollektiv aller Fahrzeuge im betrachteten Verkehrsnetz und berechnet sich somit als

$$ar = \frac{\#fc}{\#f}$$

ar *Ausstattungsrate*

#fc *Anzahl der floating cars*

#f *Anzahl aller Fahrzeuge im betrachteten Verkehrsnetz*

Formel 1: Ausstattungsrate

Je höher die Ausstattungsrate, desto mehr Informationen erhält die empfängerseitige Datenverarbeitung und umso geringer wird die Wahrscheinlichkeit von Qualitätseinbußen bedingt durch Informationsmangel.

2.2.2.1 Kommunikation

Da bei FCD Systemen Fahrzeuge als mobile Sonden im Verkehr agieren, muss die gewonnene Information durch Datenübertragung weitergegeben werden.

² In der gewählten Darstellung stellen Rechtecke aktive Komponenten dar, während die Parallelogramme Daten repräsentieren. Das umgebende Sechseck hingegen illustriert nur die Rahmenbedingung Einsatzgebiet.

Zwei Kommunikationsprinzipien können hierbei verwendet werden:

- Zentrale Kommunikation
- Dezentrale Kommunikation

Bei der **zentralen Kommunikation** versenden die Fahrzeuge an eine zentrale Instanz unter Verwendung eines bereits vorhandenen Kommunikationsnetzes. Diese zentrale Instanz übernimmt auch die Rolle des Empfängers im betrachteten Datenverarbeitungsprozess. Unter Verwendung **dezentraler Kommunikation** hingegen wird gänzlich auf eine zentrale Instanz verzichtet und Information direkt von Fahrzeug zu Fahrzeug weitergegeben. In diesem Fall übernimmt jeweils ein empfangendes Fahrzeug die Rolle des Empfängers. Die Dynamik der sich ständig relativ zueinander bewegenden Fahrzeuge bedingt, dass das für den Informationsaustausch notwendige Kommunikationsnetz fortwährend neu aufgebaut und aktualisiert werden muss. Dieser Umstand spiegelt sich in der gängigen Bezeichnung „Ad-hoc-Netze“ wider [JIE04]. Diese Kommunikationsstruktur ist in Abbildung 3 beispielhaft zur Veranschaulichung dargestellt.

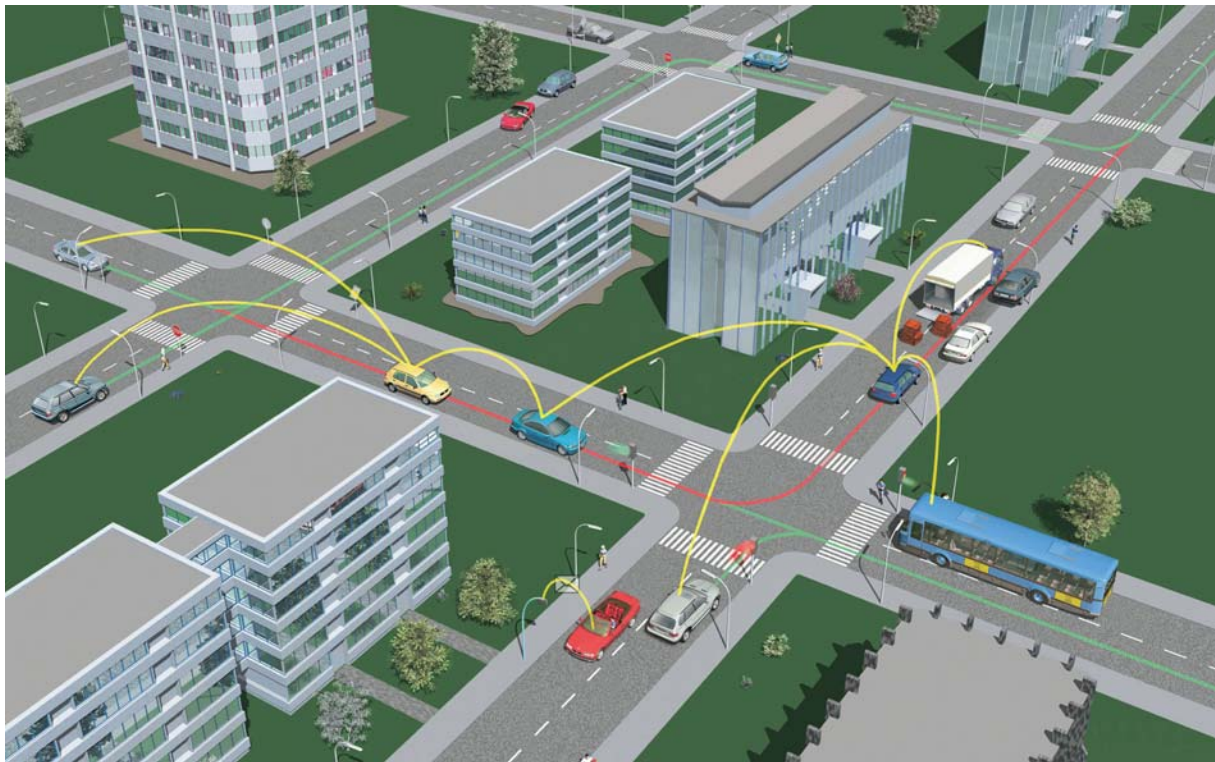


Abbildung 3: Beispiel dezentraler Kommunikation [BMW03]

Für die Richtung der Datenübertragung gibt es für zentrale Kommunikation bereits die etablierten Begriffe **up-link** und **down-link**, die für den betrachteten Datenverarbeitungsprozess übernommen und erweitert werden: ein up-link bezeichnet die Kommunikationsverbindung von einem Fahrzeug zum Empfänger, ein down-link hingegen beschreibt eine Verbindung vom Empfänger an ein Fahrzeug.

Für zentrale Kommunikation ergibt sich damit die bekannte Konstellation

- Fahrzeug – up-link – Zentrale – down-link – Fahrzeug,

bei dezentraler Kommunikation

- Fahrzeug – up-link – anderes Fahrzeug in der Rolle des Empfängers – down-link – Fahrzeug.

Für sowohl up-link als auch down-link können des Weiteren zwei Arten der Kommunikation unterschieden werden:

- Punkt-zu-Punkt
- Broadcast

Eine **Punkt-zu-Punkt**-Verbindung gibt dabei die Kommunikation zwischen einem Sender und einem Empfänger an, ein **broadcast** hingegen beschreibt den Kommunikationsvorgang, wenn ein Sender seine Informationen an alle Empfänger innerhalb seines Sendebereichs versendet.

Die in Feldversuchen der Projekten LISB (Leit- und Informationssystem Berlin) und DVB (Dynamisches Verkehrsleitsystem Berlin)³ verwendeten Bakensysteme⁴ waren infrastrukturell vorgehaltene Infrarotbaken am Straßenrand und stellten eine Sonderform der zentralen Kommunikation dar. Die Übertragungreichweite der Infrarotsender in den Fahrzeugen war sehr gering, sodass eine Datenübertragung nur in unmittelbarer Nähe einer Bake stattfinden konnte. Dies wäre eigentlich eine typische Eigenschaft dezentraler Kommunikation, doch dienten die Baken zur Sammlung der im Netz vorhandenen Informationen für eine zentrale Datenverarbeitungseinrichtung. Insgesamt ergibt sich damit ein zentrales Kommunikationsszenario.

2.2.2.2 Zielanwendungen

Obwohl der in Abschnitt 2.2.2 beschriebene Datenverarbeitungsprozess eine Vielzahl von telematischen Zielanwendungen zulässt, werden zurzeit bei FCD nur zwei Zielanwendungen betrachtet:

- Rekonstruktion der Verkehrslage
- Lokale Gefahrenwarnung

Bei der **Rekonstruktion der Verkehrslage** besteht das Ziel darin, aus den im betrachteten Verkehrsnetz verfügbaren Informationen eine Verkehrslage mit möglichst hoher zeitlicher und räumlicher Genauigkeit abzuleiten. Verkehrsinformation ist ein Extrakt aus der Verkehrslage und stellt somit eine Untermenge dieser dar.

Die **lokale Gefahrenwarnung** dagegen verwendet die vorhandenen Informationen, um ein „Gefahrenbild“ zu rekonstruieren. Dieses Gefahrenbild vereint alle für

³ Eine Übersicht über bereits abgeschlossene Projekte zum Thema Floating Car Data bis zum Jahr 2001 findet sich in [HUB01a], nicht erfasst ist das Projekt INVENT, das in einem Teilprojekt ebenfalls FCD beinhaltete und Mobilfunk zur Kommunikation verwendete.

⁴ [OFF01], S.52, S.57f

Straßenverkehrsteilnehmer potenziellen Gefahren wie Rutschgefahr, Glatteis, Sichtbehinderungen durch Nebel oder Unfälle. Da ein Störungsanfang ebenso eine lokale Gefahr darstellt, ergibt sich hier eine Überschneidung mit der Zielanwendung Rekonstruktion der Verkehrslage.

2.2.2.3 Einsatzgebiet

Da FCD Verfahren über die Datenbasis Rückschlüsse auf ihr Umfeld zu ziehen versuchen, sind Modellannahmen über den zugrunde liegenden Verkehr in den verwendeten Methoden enthalten. Diese leiten sich aus der Art des Verkehrsnetzes ab, für die ein Verfahren konzipiert wurde.

2.2.3 Varianten von FCD-Verfahren

Der im Abschnitt 2.2.2 beschriebene allgemeine Datenverarbeitungsprozess lässt viele Freiheiten bei der Wahl der Datenbasis, der Zwischengrößen, der Kommunikation und der genauen Repräsentation des Ergebnisses, aber auch bei der Datenverarbeitung. Insbesondere besteht völlig freie Wahl der Aufteilung der notwendigen Datenverarbeitungsschritte in fahrzeugseitige und empfängerseitige Anteile. Dies stellt jedes FCD-Verfahren vor die Problematik des Informationsverlusts. Empfängerseitig maximale Information⁵ ist aus qualitativer Sicht erwünscht und kann durch fahrzeugseitiges Versenden maximal möglicher Information erreicht werden. Aus Kostensicht ist jedoch eine Datenverdichtung im Fahrzeug wünschenswert, die zum Ziel hat, die durch das entstehende Meldeaufkommen verursachten Kosten zu minimieren. Im **Spannungsfeld Informationsverlust/Kosten** setzt so jedes Verfahren in der Entwicklung unterschiedliche Schwerpunkte.

Zur besseren Übersicht wird für jedes FCD-Verfahren ein Profil angegeben, das das Verfahren im Datenverarbeitungsprozess eindeutig identifiziert und das Aussehen von Tabelle 1 annimmt.

<i>Zielanwendung</i>	Zielanwendung 1
<i>Einsatzgebiet</i>	Einsatzgebiet 1
<i>Schwerpunkt</i>	Entwicklungsschwerpunkt 1
<i>Grundgedanke</i>	Grundgedanke 1
<i>Kommunikation</i>	Offline, zentral, dezentral (up-link: Kommunikationsart 1, down-link: Kommunikationsart 2)
<i>Datenbasis</i>	Datenbasis 1
<i>DV Fahrzeug</i>	Liste der wesentlichen Datenverarbeitungsschritte 1
<i>Zwischengröße up-link</i>	Zwischengröße 1
<i>Ortsbezug ZG up-link</i>	Position, Strecke
<i>DV Empfänger</i>	Liste der wesentlichen Datenverarbeitungsschritte 2
<i>Zwischengröße down-link</i>	Zwischengröße 2

Tabelle 1: Profil eines FCD-Verfahrens

⁵ Damit sei die Informationsmenge bezeichnet, die beim Empfänger keinen Informationsverlust, aber auch keine Redundanzen entstehen lässt.

Zielanwendung und *Einsatzgebiet* beschreiben dabei die ergebnisrelevante Zielanwendung, und das Einsatzgebiet, für das das Verfahren konzipiert wurde.

Da sich die Konzeption des Verfahrens immer im bereits beschriebenen Spannungsfeld Informationsverlust/Kosten bewegt, ist in *Schwerpunkt* angegeben, auf welchen Aspekt des Spannungsfelds bei der Entwicklung des Verfahrens besonderes Gewicht gelegt wurde.

In *Grundgedanke* wird die zugrunde liegende Idee des Verfahrens kompakt beschrieben.

Kommunikation gibt die verwendete Kommunikationsvariante des Verfahrens an. Die auftretenden Kommunikationsvarianten sind zentral für zentrale Kommunikation, dezentral für dezentrale Kommunikation und offline für eine Datenaufzeichnung im Fahrzeug anstelle einer Kommunikation zum Zweck einer nachträglichen Auswertung der Daten der Versuchsfahrten. Als Zusatzinformation ist in Klammer für alle Varianten mit Ausnahme von offline die Art der Kommunikation im up-link und down-link angegeben.

Datenbasis beschreibt die Rohdaten, die dem Fahrzeug zur Verfügung stehen. Diese Datenbasis geht als Eingabe in *DV Fahrzeug* (fahrzeugseitige Datenverarbeitung) ein, in der die wesentlichen Verarbeitungsschritte von der Datenbasis hin zur fahrzeugseitigen *Zwischengröße up-link* angegeben werden. Als Zusatzinformation ist der *Ortsbezug ZG up-link* zu sehen, der angibt, für welche räumliche Ausdehnung die Zwischengröße up-link gültig ist. Position beschreibt hierbei einen Punkt im Straßennetz, Strecke hingegen eine räumliche Ausdehnung in Form eines begrenzten Straßenstücks.

DV Empfänger schließlich führt analog zu *DV Fahrzeug* die Verarbeitungsschritte von der Zwischengröße up-link bis zum Ergebnis der Zielanwendung an. Wird darüber hinausgehend Information wieder zurück an die Fahrzeuge gesendet, erscheint diese in *Zwischengröße down-link*.

Wurden in einem Verfahren keine Aussagen zu einem der genannten Punkte getroffen, wird dies durch die Angabe von „-“ im Profil gekennzeichnet.

2.2.3.1 Extended Floating Car Data

Das FCD-Verfahren eXtended Floating Car Data (XFCD) [HUB01a] beinhaltet als einziges der vorgestellten Verfahren beide Zielanwendungen, also sowohl die Rekonstruktion der Verkehrslage, als auch die lokale Gefahrenwarnung. XFCD verwendete zu diesem Zweck eine breitere Datenbasis als andere FCD Verfahren. Sowohl für die Rekonstruktion der Verkehrslage als auch die lokale Gefahrenwarnung wurden Daten fahrzeugseitig aufgezeichnet ohne versendet zu werden, um zu einem späteren Zeitpunkt Auswertungen zu ermöglichen. Aufgrund des fehlenden Datenversands wird als Kommunikation der Begriff offline verwendet, der andeuten soll, dass kein Nachrichtenaustausch stattgefunden hat.

2.2.3.1.1 Rekonstruktion der Verkehrslage

XFCD wurde für das Einsatzgebiet Autobahnnetz konzipiert. Zwar wurden allgemeine Aussagen über eine prinzipielle Anwendbarkeit des Verfahrens in anderen Verkehrsnetzarten durch Anpassung der Parametrierung gemacht, alle Untersuchungen wurden jedoch auf ausgewählten

Strecken des Autobahnnetzes im Großraum München durchgeführt, weswegen das Einsatzgebiet auf Autobahn festgelegt wird.

Der Grundgedanke des Verfahrens ging davon aus, dass Störungsflanken – Störungsein/ausfahrten – aus einer fortwährenden Überwachung des aktuellen Geschwindigkeitsniveaus abgeleitet werden können. In Kombination mit einer Schwellwertgeschwindigkeit deutete eine Unterschreitung des Schwellwerts auf eine Störungseinfahrt, eine Überschreitung auf eine Störungsausfahrt hin. Der Schwerpunkt der Verfahrensentwicklung lag damit in der fahrzeugseitigen Datenverarbeitung in Form der Erkennung der Störungsflanken.

2.2.3.1.1.1 Profil

<i>Zielanwendung</i>	Rekonstruktion der Verkehrslage
<i>Einsatzgebiet</i>	Autobahn
<i>Schwerpunkt</i>	Fahrzeugseitige Datenverarbeitung
<i>Grundgedanke</i>	Störungseinfahrten sind durch einen starken Geschwindigkeitsabfall und/oder eine signifikante Unterschreitung eines Geschwindigkeitsniveaus erkennbar
<i>Kommunikation</i>	Offline
<i>Datenbasis</i>	Momentangeschwindigkeit, Position, Straßenklasse, Warnblinkaktivität, Aktivität des rechten Blinkers
<i>DV Fahrzeug</i>	Störungsindikatoren + Zusatzkenngrößen für Sonderfälle – Fuzzy-Inferenz – Störungsindex – Störungsflanken
<i>Zwischengröße up-link</i>	Störungsflankenereignisse: Störungseinfahrt, Störungsausfahrt
<i>Ortsbezug ZG up-link</i>	Position
<i>DV Empfänger</i>	-
<i>Zwischengröße down-link</i>	-

Tabelle 2: Profil XFCD, Rekonstruktion der Verkehrslage

2.2.3.1.1.2 Verfahrensbeschreibung

Die Datenbasis für die Rekonstruktion der Verkehrslage umfasst folgende Größen:

- Momentangeschwindigkeit
- Position
- Straßenklasse
- Warnblinkaktivität
- Aktivität des rechten Blinkers

Das Verfahren stützt sich als Primärgröße auf die Momentangeschwindigkeit, aus der zwei Störungsindikatoren abgeleitet werden, auf Basis derer versucht wird, eine Störungseinfahrt zu erkennen.

Die beiden Störungsindikatoren lauten:

- Starke Verzögerung s1
- Niedriges Geschwindigkeitsniveau s2

Starke Verzögerung s1 stellt die Summe der letzten zehn sekundlich vorliegenden Verzögerungswerte dar und soll somit eine Störungseinfahrt mit hohen Verzögerungswerten durch aktiven Bremsengriff charakterisieren. Als Aktivierungsbedingung wird die Unterschreitung der Momentangeschwindigkeit von 75 km/h definiert.

$$s1(t) = \begin{cases} \Delta v_{s1}(t) & \text{für } v(t) \leq 75 \text{ [km/h]} \\ 0 & \text{für } v(t) > 75 \text{ [km/h]} \end{cases}$$

mit

$$\Delta v_{s1}(t) = \sum_{k=t-10}^t a(k) \quad [\text{m/s}]$$

$a(k)$ Verzögerungswert zum Zeitpunkt k
 $v(t)$ Momentangeschwindigkeit zum Zeitpunkt t
 $s1(t)$ Störungsindikator $s1$ zum Zeitpunkt t

Formel 2: Störungsindikator Starke Verzögerung s1

Da Störungseinfahrten nicht zwingend von solch signifikanten Verzögerungswerten begleitet werden müssen, summiert s2 sekundlich die Differenzgeschwindigkeit von 75 km/h auf, was qualitativ als Maß für die Unterschreitung des Geschwindigkeitsniveaus von 75 km/h gewertet wird. Als Aktivierungsbedingung wird wie bei s1 das Unterschreiten der Momentangeschwindigkeit unter das Niveau 75 km/h festgelegt, das heißt ein Unterschreiten dieser Geschwindigkeit startet den Summationsprozess, ein Überschreiten setzt s2 auf Null zurück. Um das Zurücksetzen bei kurzfristigen Überschreitungen dieses Niveaus bei der Störungseinfahrt durch den Stop&Go-Charakter zu vermeiden, wird die Aktivierungsbedingung jedoch noch um eine trägere, über 30 Sekunden gemittelte Durchschnittsgeschwindigkeit erweitert. Somit startet der Summationsprozess bei einer Niveauunterschreitung der Momentan- oder der Durchschnittsgeschwindigkeit, das Zurücksetzen erfolgt nur bei Niveauüberschreitung beider Geschwindigkeiten.

$$s2(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } (v(t) > 75) \wedge (\overline{v}_{30}(t) > 75) \text{ [km/h]} \\ s2(t-1) + \Delta v(t) & \text{sonst} \end{cases}$$

mit

$$\overline{v}_{30}(t) = \frac{1}{30} \sum_{k=t-30}^t v(k)$$

$$\Delta v(t) = \begin{cases} 75 - v(t) & \text{für } v(t) \leq 75 \text{ [km/h]} \\ 0 & \text{für } v(t) > 75 \text{ [km/h]} \end{cases}$$

$\overline{v}_{30}(t)$	Mittlere Geschwindigkeit im Intervall $[t-30, t]$
$\Delta v(t)$	Differenzgeschwindigkeit von 75 km/h zum Zeitpunkt t
$s2(t)$	Störungsindikator $s2$ zum Zeitpunkt t
$v(t)$	Momentangeschwindigkeit zum Zeitpunkt t

Formel 3: Störungsindikator Niedriges Geschwindigkeitsniveau $s2$

Als Ergebnis einer empirischen Analyse wurden Sonderfälle erkannt, bei denen die Störungsindikatoren $s1$ und $s2$ alleine fälschlicherweise eine Störung anzeigen würden:

- Verlassen der Autobahn an einer Anschlussstelle
- Durchqueren eines Autobahnkreuzes
- Halten an einem Rastplatz
- Halten am Fahrbahnrand aufgrund einer Panne

Durch Definition von Zusatzkenngrößen wurde nun versucht, diese Sonderfälle zu erkennen. Das Verlassen der Autobahn an einer Anschlussstelle und das Durchqueren eines Autobahnkreuzes wurde durch Ableitung der binären Kenngrößen BAB und AK aus Daten des Navigationssystems bewerkstelligt, d.h. diese Kenngrößen können die Werte „wahr“ und „falsch“ annehmen⁶. Eine Kenngröße für Halte an einem Rastplatz aus den Daten des Navigationssystems abzuleiten war zum damaligen Zeitpunkt nicht eindeutig möglich, sodass hier die Annahme getroffen wurde, diese Situation durch eine Aktivität des rechten Blinkers ARB in Kombination mit dem Nicht-Vorhandensein einer anderen Möglichkeit des Verlassens der Autobahn – also falls AK den Wert „falsch“ annimmt – erkennen zu können. Ähnlich wurde versucht, die letzte Situation – das Halten am Fahrbahnrand aufgrund einer Panne – durch eine Aktivität des Warnblinkers AWB zu identifizieren.

Als weiteres Ergebnis der schon erwähnten empirischen Analyse wurde $s2$ im Gegensatz zu $s1$ als stabiler erkannt und zum primären Hauptindikator erhoben, $s1$ liefert als sekundärer Hauptindikator Informationen zur räumlichen Präzisierung der genauen Position der Störungseinfahrt. Die Zusatzkenngrößen für Sonderfälle BAB, AK, ARB und AWB wurden dazu verwendet, die Problemsituationen zu erkennen, mit dem Ziel, die beiden Hauptindikatoren entsprechend der jeweiligen Situation abzuschwächen oder zu verstärken.

⁶ Darüber hinaus wird der Wert „wahr“ der Kenngröße BAB als Aktivierungsbedingung des gesamten Verfahrens verwendet.

Dieses Verhalten wurde durch eine Fuzzy-Inferenz⁷ umgesetzt, die es ermöglichte, die Hauptindikatoren und die Zusatzkenngrößen mit unscharfen Grenzen in Bereiche wie „niedrig“, „mittel“, „hoch“ und „sehr hoch“ zu unterteilen und darauf aufbauend eine Menge von logischen Regeln zu definieren, die situationsgerecht die beschriebenen Abschwächungen oder Verstärkungen der Hauptindikatoren quantifizieren. Das Ergebnis der Fuzzy-Inferenz war der Störungsindex SI, der für einen gegebenen Zeitpunkt als Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein eines Störungsereignisses im betrachteten Zeitfenster interpretiert werden kann.

Durch Vergleiche des maschinell erzeugten Störungsindex SI mit Videoaufzeichnungen der zugrunde liegenden realen Verkehrssituationen wurde ein unterer Grenzwert des SI von 0,658 als das Störungsflankenereignis Störungseinfahrt definiert. Die Erkennung einer Störungsausfahrt durch entsprechendes Überschreiten dieser Schwelle erwies sich aufgrund zu starker Schwankungen von SI um diesen Wert als nicht eindeutig und daher nicht tragfähig. Als Abhilfe wurde ein exponentiell geglätteter Geschwindigkeitsmittelwert definiert, dessen Überschreitung der schon mehrfach verwendeten Grenze von 75 km/h als das Störungsflankenereignis Störungsausfahrt festgelegt wurde.

$$\overline{v_{Stör}}(t) = (1 - \alpha) \cdot \overline{v_{Stör}}(t-1) + \alpha \cdot v(t)$$

mit

$$\alpha = 0,05$$

$$\overline{v_{Stör}}(1) = v(1)$$

$\overline{v_{Stör}}(t)$	<i>Geschwindigkeitsmittelwert zum Zeitpunkt t</i>
α	<i>Glättungsparameter</i>
$v(t)$	<i>Momentangeschwindigkeit zum Zeitpunkt t</i>

Formel 4: Exponentiell geglätteter Geschwindigkeitsmittelwert

Für eine eindeutige Zuordnung zum betrachteten Straßennetz wird einem erkannten Störungsflankenereignis im letzten Schritt die entsprechende Position zugewiesen.

Als Veranschaulichung ist in Abbildung 4 ein beispielhafter zeitlicher Ablauf des beschriebenen Verfahrens zur Störungserkennung dargestellt.

⁷ Mit Hilfe der Fuzzy-Logik wird die menschliche Entscheidungslogik auf Grundlage unscharfer, eventuell unvollständiger Daten modelliert. Für weitere Details sei auf [LAM03] verwiesen.

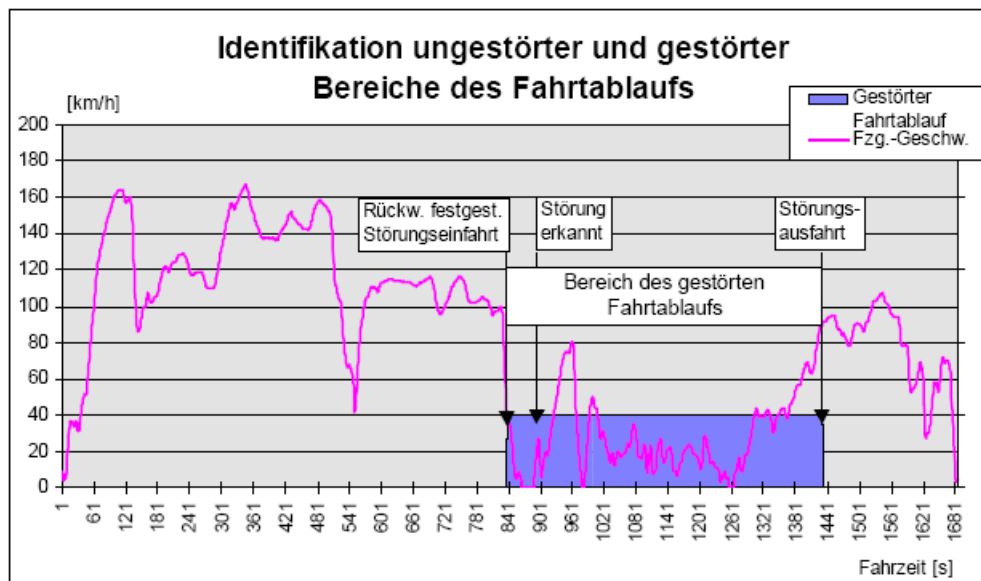


Abbildung 4: Zeitbezogene Darstellung der Erkennung gestörter und ungestörter Bereiche des Fahrtablaufs [HUB01b]

Die Geschwindigkeitsganglinie wird permanent überwacht und nahe des Zeitpunkts 900s eine Störung in Form einer Störungseinfahrt durch den Störungsindikator Niedriges Geschwindigkeitsniveau s_2 erkannt. Unter zu Hilfenahme des Störungsindikators Starke Verzögerung s_1 kann die Störungseinfahrt rückwirkend räumlich präzisiert werden, sodass die tatsächliche Störungseinfahrt nahe des Zeitpunkts 840s zu liegen kommt. Der exponentiell geglättete Mittelwert schließlich erkennt die Störungsausfahrt nahe der Fahrzeit von 1440s.

2.2.3.1.2 Lokale Gefahrenwarnung

In diesem Teil des XFCD-Verfahrens [HUB01a] wurde eine wetterbezogene Situationserkennung, also die Erkennung nur einer Teilmenge aller lokalen Gefahren, umgesetzt. Folgende drei Zielanwendungen wurden ausgewählt:

- Erkennung niederschlagsbedingter Sichtbehinderungen
- Thermische Profilierung von Straßenabschnitten
- Erfassung von Rutschgefahren

Als Testfeld dienten gemischte Versuchsstrecken, sodass sowohl Autobahnnetze, als auch Stadtnetze als Einsatzgebiet festgelegt werden können.

Als Grundgedanken für die Erkennung niederschlagsbedingter Sichtbehinderungen wurde davon ausgegangen, dass diese aus der Scheibenwischeraktivität abgeleitet werden können, für die thermische Profilierung war das Äquivalent der Temperatursensor. Für die Erfassung von Rutschgefahren wurde angenommen, dass indirekt aus den Signalen der Regeleinriffe von ABS (Anti-Blockiersystem) und ASC (Antriebsstabilitätskontrolle) auf den Reibwert und damit auf die Rutschgefahr geschlossen werden kann.

Alle diese Zielanwendungen hatten zum Ziel, fahrzeugseitig Gefahren zu erkennen, damit war der Schwerpunkt der Verfahrensentwicklung in der fahrzeugseitigen Datenverarbeitung.

Allgemein ist zu bemerken, dass die vorliegenden Informationen nach Aussage des Autors noch der „...*Konkretisierung, Validierung und Bewertung...*“⁸ bedürfen, also kein in sich geschlossenes Verfahren darstellen.

2.2.3.1.2.1 Profil

<i>Zielanwendung</i>	Lokale Gefahrenwarnung: 1) Erkennung niederschlagsbedingter Sichtbehinderungen 2) Thermische Profilierung von Straßenabschnitten 3) Erfassung von Rutschgefahren
<i>Einsatzgebiet</i>	Autobahn, Stadt
<i>Schwerpunkt</i>	Fahrzeugseitige Datenverarbeitung
<i>Grundgedanke</i>	1) Niederschlagsbedingte Sichtbehinderungen sind durch Scheibenwischeraktivität erkennbar 2) Profilierung durch Temperatursensor 3) Bestimmung des Reibwerts ist indirekt aus Regeleingriffen des ABS und ASC ableitbar
<i>Kommunikation</i>	Offline
<i>Datenbasis</i>	1) Scheibenwischeraktivität, Momentangeschwindigkeit 2) Temperatur 3) Regeleingriffe des ABS und ASC, Beschleunigung
<i>DV Fahrzeug</i>	1) Scheibenwischfrequenz + Momentangeschwindigkeit – Fuzzy-Inferenz – Sichtbehinderungsflanken 2) Einfache Rundung – Pufferung – Temperaturprofil 3) -
<i>Zwischengröße up-link</i>	1) Sichtbehinderungsflankenereignisse: Einfahrt, Ausfahrt 2) Temperaturprofil 3) -
<i>Ortsbezug ZG up-link</i>	1) Position 2) Strecke 3) Position
<i>DV Empfänger</i>	-
<i>Zwischengröße down-link</i>	-

Tabelle 3: Profil XFCN, lokale Gefahrenwarnung

2.2.3.1.2.2 Verfahrensbeschreibung

Für die **Erkennung niederschlagsbedingter Sichtbehinderungen** wurden als Datenbasis die

- Aktivität des Scheibenwischers und die
- Momentangeschwindigkeit

verwendet.

⁸ [HUB01a], S.157

Nicht integriert, jedoch als Erweiterung vorgeschlagen wurden darüber hinaus der

- Status des Abblendlicht und der Nebelleuchte, der
- Status des Schiebedachs, die
- Veränderung der Momentangeschwindigkeit und der
- Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug.

Als erster Indikator zum Anzeigen der niederschlagsbedingten Sichtbehinderung wurden die Aktivitätsimpulse des Scheibenwischers der letzten 30 Sekunden zur Scheibenwischfrequenz SWF30 verdichtet. Da ein Zusammenhang zwischen der zu erwartenden Menge an Niederschlag auf der Windschutzscheibe und der Momentangeschwindigkeit empirisch ermittelt wurde, bildete diese ohne weitere Vorverarbeitung den zweiten Indikator.

Die Indikatoren wurden in einer Fuzzy-Inferenz zunächst mit fließenden Übergängen in Bereiche wie „kein“, „niedrig“, „mäßig“, „mittel“ und „hoch“ unterteilt und anschließend durch eine Menge von logischen Regeln zur Ausgangsgröße Niederschlagsstärke NSI verknüpft. Wegen der starken Schwankungen der sekundlich berechneten Niederschlagsstärke wurde das arithmetische Mittel über die letzten 60 Messwerte als Endgröße festgelegt. Durch eine Tabelle mit empirisch ermittelten Schwellenwerten konnte diese anschließend in die Kategorien „kein“, „leicht“, „mäßig/mittel“ und „stark“ eingestuft werden, die Zustandsübergänge bei einem Wechsel der Kategorie lag dann als Sichtbehinderungsflankenereignis Einfahrt, bzw. Ausfahrt vor.

In einer Analyse des Verfahrens durch Vergleich der Verfahrensergebnisse mit manuell nachbearbeiteten Kennzeichnungen der Niederschlagsstärken basierend auf Videoaufzeichnungen wurden Sprühfahnen von vorausfahrenden Fahrzeugen, insbesondere Schwerverkehr, als Störgrößen erkannt. Nicht umgesetzt, jedoch als Abhilfe vorgeschlagen wurde die Aufnahme einer auf einem Abstandssensor basierenden Kenngröße, die der Fuzzy-Inferenz zugeführt wird. Bei Vorhandensein eines vorausfahrenden Fahrzeugs könnte diese das Endergebnis entsprechend korrigieren. Der Status von Abblendlicht, Nebelleuchte und des Schiebedachs, sowie eine signifikante Verringerung der Momentangeschwindigkeit wurden als zusätzliche Kenngrößen zur Erkennung von Einfahrten in Gebiete mit Sichtbehinderungen durch Niederschlag empfohlen.

Die **Thermische Profilierung von Straßenabschnitten** stellt für sich alleine keine lokale Gefahr dar. Es wurden mit Hilfe des Temperatursensors, der die alleinige Datenbasis stellte, und Pufferung der Werte streckenbezogene Temperaturprofile aufgezeichnet, die mit den Messwerten von Wettererfassungsanlagen entlang einer Autobahn als Referenz verglichen wurden. Es zeigte sich eine hohe Korrelation der Werte mit im Zeitverlauf geringfügig trägerem und im Wert höherem Verlauf der fahrzeugseitig erfassten Profile.

Für die **Erfassung von Rutschgefahren** stand keine direkte Sensorik zur Ermittlung von Reibwerten als Maß für die Rutschgefahr zur Verfügung. Folglich wurde versucht, indirekt aus einer Datenbasis, bestehend aus Signalen von Regeleinrichtungen des

- Anti-Blockier-Systems ABS und der
- Antriebsstabilitätskontrolle ASC

auf eine lokale Rutschgefahr zu schließen. Anstelle eines konkreten Verfahrens wurden die Ergebnisse von Untersuchungen auf trockener, feuchter und vereister Fahrbahn diskutiert. Bei

dem Versuch, diese Daten auf eine lokale Rutschgefahr zurückzuführen, trat als wesentliche Störgröße das Fahrverhalten zu Tage. So führte bei glatten Fahrbahnverhältnissen eine angepasste Fahrweise zu deutlich weniger Regeleingriffen als eine dynamische Fahrweise bei trockenen Fahrbahnverhältnissen. Erschwerend hinzukommen Einflüsse der Fahrbahnart, der Fahrbahnlängsneigung sowie der Zustand der Bereifung. Als kompensierende Kenngrößen wurden die Beschleunigung, die mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit und die Temperatur vorgeschlagen. Die Untersuchungen indizierten eine höhere Wahrscheinlichkeit von Rutschgefahr als Grund eines Regeleingriffes bei mittleren Geschwindigkeiten zwischen 50 und 100 km/h, jedoch nur für ein Fahrverhalten mit „normalen“ Beschleunigungen. Die Aussagekraft des Temperatursignals wurde durch die Möglichkeit, dass lokale Eisflächen auf Brücken oder schattigen Einschnitten bis zu Temperaturen von +10°C vorkommen, eingeschränkt. Schließlich wurde noch die Beschleunigung als Maß für die Dynamik des Fahrverhaltens bei einem Anfahrvorgang angegeben.

2.2.3.2 City-FCD

Diese Verfahrensvariante ([DEM03], [KER05]) wurde für die Rekonstruktion der Verkehrslage im innerstädtischen Bereich ausgelegt. Im Grundgedanken von City-FCD ging man davon aus, dass die Zeitpunkte eines Störungsauf-, bzw. -abbaus durch eine signifikante Abweichung einer fahrzeugseitig ermittelten Segmentreisezeit von einer zentralseitig prognostizierten Reisezeit für das betrachtete Segment erkennbar waren. Im Gegensatz zu anderen Verfahren benötigte City-FCD daher bereits für die fahrzeugseitige Datenerzeugung Informationen einer Zentrale, die die Fahrzeuge permanent mit den prognostizierten Segmentreisezeiten versorgte. Das Ziel dieser Vorgehensweise war es, Mehrfachmeldungen einer Verkehrsstörung zu vermeiden. Da als fahrzeugseitige Datenverarbeitung eine einfache Ermittlung der Reisezeit zum Tragen kam, war der Schwerpunkt der Verfahrensentwicklung in der Minimierung des Kommunikationsaufkommens. Getestet wurde das Verfahren anhand numerischer Simulation.

2.2.3.2.1 Profil

<i>Zielanwendung</i>	Rekonstruktion der Verkehrslage
<i>Einsatzgebiet</i>	Stadt
<i>Schwerpunkt</i>	Minimierung des Kommunikationsaufkommens
<i>Grundgedanke</i>	Zeitpunkt eines Störungsauf- oder -abbaus ist durch eine signifikante Abweichung einer fahrzeugseitig gemessenen und zentralseitig prognostizierten Reisezeit feststellbar
<i>Kommunikation</i>	Zentral (up-link: Punkt-zu-Punkt, down-link: broadcast)
<i>Datenbasis</i>	Aktuelle Reisezeit, Referenzreisezeit, Schwellenwert
<i>DV Fahrzeug</i>	Abweichungsermittlung – Schwellenwertvergleich
<i>Zwischengröße up-link</i>	Aktuelle Reisezeit
<i>Ortsbezug ZG up-link</i>	Strecke
<i>DV Empfänger</i>	Reisezeitprognose
<i>Zwischengröße down-link</i>	Referenzreisezeit, Schwellenwert

Tabelle 4: Profil City-FCD

2.2.3.2.2 Verfahrensbeschreibung

Die fahrzeugseitige Datenbasis für das FCD-Verfahren City-FCD wurde festgelegt auf:

- Aktuelle Reisezeit
- Liste von Segmenten mit
 - Referenzreisezeit
 - Schwellenwert

Für eine Liste von Segmenten wurden bei diesem Verfahren im Fahrzeug Informationen in Form der Reisezeit aufgezeichnet. Zu diesem Zweck hielt jedes Fahrzeug einen Datenspeicher vor, der für jedes der betrachteten Segmente die Referenzreisezeit und einen zugehörigen Schwellenwert speicherte. Befuhr das Fahrzeug ein Segment dieser Liste, wurde zum Zeitpunkt der Ausfahrt aus diesem Segment die Zeitdifferenz zum Einfahrtzeitpunkt als aktuelle, fahrzeugseitige Reisezeit bestimmt.

$$R_k^{(F)} = t_{out} - t_{in}$$

mit

$R_k^{(F)}$	<i>Aktuelle, fahrzeugseitige Reisezeit auf dem Segment k</i>
t_{out}	<i>Ausfahrtzeitpunkt</i>
t_{in}	<i>Einfahrtzeitpunkt</i>

Formel 5: Bestimmung der aktuellen Reisezeit

Wich dieser Wert betragsmäßig signifikant, d.h. um mehr als den Schwellenwert von der Referenzreisezeit ab, wurde eine Nachricht mit der aktuell gemessenen Reisezeit über eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung an die Zentrale versendet.

$$|R_k^{(F)} - R_k^{(Z)}| > \Delta R_k^{(Z)}$$

mit

$R_k^{(F)}$	<i>Aktuelle, fahrzeugseitige Reisezeit auf dem Segment k</i>
$R_k^{(Z)}$	<i>Zentraleseitige Referenzreisezeit</i>
$\Delta R_k^{(Z)}$	<i>Schwellenwert</i>

Formel 6: Bedingung für den Versand einer Nachricht

Der Empfang einer Nachricht wurde im Anschluss zentraleseitig bei einem Anstieg der aktuellen Reisezeit als Störungsaufbau, bei einem Abfall als Störungsabbau interpretiert. Der Ortsbezug war durch das Segment vorgegeben, der genaue Zeitpunkt wurde jedoch noch einer Korrektur unterzogen. Da Fahrzeuge ihre Reisezeiten erst zum Zeitpunkt der Segmentausfahrt versenden konnten, bezogen sich diese Reisezeiten auf die vergangene Segmentdurchfahrt, diese Information war demnach bereits veraltet. Aus diesem Grund wurde der Zeitpunkt für den Störungsauf- bzw. -abbau um ein Korrekturzeitintervall, das der soeben empfangenen Reisezeit entsprach, in die Vergangenheit verschoben.

$$R_k^{(Z)}(t - \Delta t) = R_k^{(F)}(t)$$

$$\Delta t = R_k^{(F)}$$

mit

$R_k^{(Z)}(t - \Delta t)$ *Zentralseitige Referenzreisezeit zum Zeitpunkt $(t - \Delta t)$*

$R_k^{(F)}(t)$ *Aktuelle, fahrzeugseitige Reisezeit zum Zeitpunkt t*

Δt *Korrekturzeitintervall*

Formel 7: Berechnung der Referenzreisezeit mit zeitlicher Korrektur

Der empfangene und zeitlich korrigierte Reisezeitanstieg bzw. -abfall bildete die erste Stützstelle einer Prognose der Reisezeit in Form einer Interpolation. Mit Hilfe einer zweiten Nachricht eines Fahrzeugs oder alternativ zentralseitig vorhandener Daten über Störungsaufbau und -abbau wurde versucht, den zukünftigen Störungsverlauf nachzubilden. Details zur weiteren Funktionsweise der Prognose wurden nur in Form einer Grafik beschrieben, die in Abbildung 5 wiedergegeben ist.

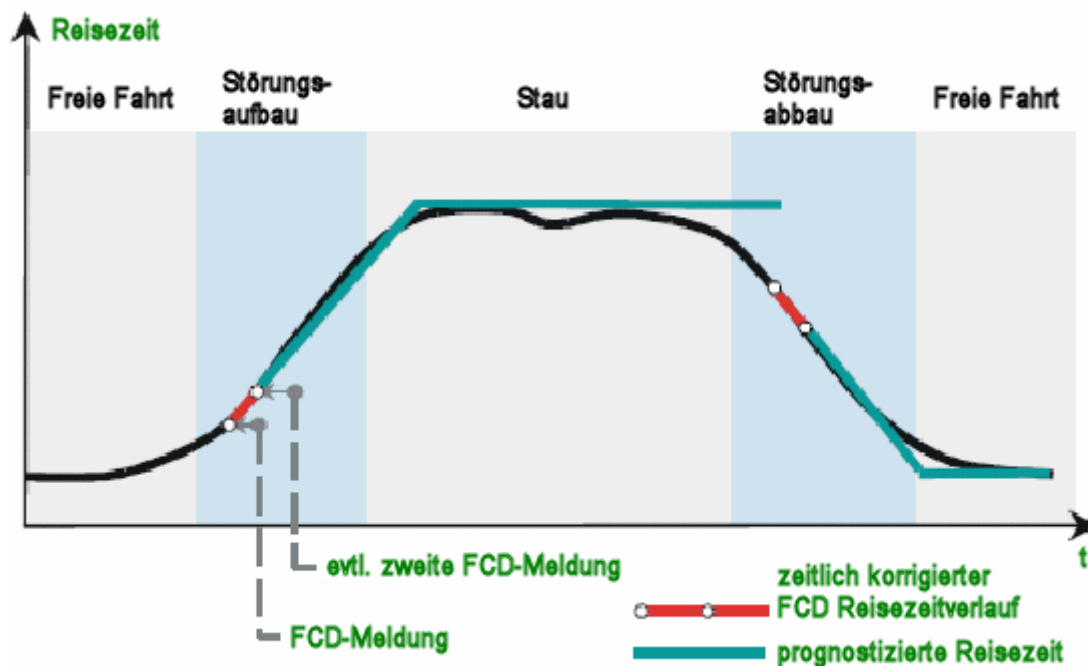


Abbildung 5: Prognose der Reisezeit ([DEM03], übersetzt aus dem Englischen)

Die Grafik legt eine lineare Interpolation der ansteigenden Flanke beim Störungsaufbau, bzw. der abfallenden Flanke beim Störungsabbau nahe, gestützt durch die bereits beschriebene Vorgehensweise der beiden Stützstellen in Form von empfangenen Nachrichten. Ebenfalls ersichtlich ist die zeitliche Korrektur dieser Meldungen von den grauen Punkten zu den Endpunkten des rot dargestellten, gemeldeten Reisezeitverlaufs. Der Knick der Prognoselinie zurück in die horizontale Lage bleibt jedoch unerklärt, Erläuterungen zu einer nachfolgend durchgeführten statistischen Analyse des Verfahrens lassen jedoch auf ein auf historischen Daten aufbauendes Lernverfahren schließen.

Basierend auf der Prognose konnte die Zentrale so für alle betrachteten Segmente die zukünftige Störungsentwicklung in Form neuer Referenzreisezeiten und noch tolerierbarer Abweichungen davon in Form der Schwellwerte berechnen. Diese wurden per Broadcast zurück an die Fahrzeuge gesendet, welche damit ihre Datenbasen aktualisierten. Für diese Fahrzeuge wurde nun die neue Referenzreisezeit zu der neuen erwarteten Reisezeit.

Eine in der Zentrale bereits bekannte – und über den Broadcast bekannt gegebene – Störung führte somit fahrzeugseitig zu einem deutlich höheren Erwartungswert der Reisezeit, was wiederum eine Mehrfachmeldung einer bereits bekannten Störung verhinderte. Erst eine nicht von der Zentrale prognostizierte Störungsentwicklung, indiziert durch die betragsmäßige Abweichung der aktuellen Reisezeit von der neuen Referenzreiszeit um mehr als den neuen Schwellwert führte zum Absetzen einer Nachricht an die Zentrale.

Für den beschriebenen Prozess ist eine Initialisierung der fahrzeugseitig gespeicherten Segmentliste durch Festlegung des Umfangs der Liste, sowie der Anfangswerte der darin enthaltenen Referenzreisezeiten und Schwellwerte notwendig.

Über die Anfangswerte werden keine Aussagen getroffen, in Bezug auf den Listenumfang wird aber von der „...*Möglichkeit zur dynamischen Anpassung des FCD-Meldestreckennetzes...*“⁹, also der Segmentliste gesprochen.

2.2.3.3 Frequenzdomänenverfahren

In [LAM03] wurde ein Verfahren entwickelt, das Frequenztransformation verwendet, um eine netzweite Verkehrslage zu rekonstruieren. Als Grundgedanke wurde davon ausgegangen, dass der Übergang von freiem zu Stop&Go-Verkehr und umgekehrt im Frequenzspektrum einer Geschwindigkeitsganglinie anhand der Verteilung der Frequenzen darin ablesbar wird. Der Schwerpunkt der Verfahrensentwicklung lag damit auf der fahrzeugseitigen Datenverarbeitung in der Erkennung dieser Zustandsübergänge.

Es wurde in einem Feldversuch auf einem gemischten Straßennetz in Wien validiert, das sowohl Autobahnabschnitte als auch innerstädtische Abschnitte enthielt. Die generierten Daten wurden fahrzeugseitig für Auswertungen zu einem späteren Zeitpunkt gespeichert. Als Einsatzgebiet wird daher Autobahn und Stadt, als Kommunikation Offline festgelegt.

⁹ [KER05], S.325

2.2.3.3.1 Profil

<i>Zielanwendung</i>	Rekonstruktion der Verkehrslage
<i>Einsatzgebiet</i>	Autobahn, Stadt
<i>Schwerpunkt</i>	Fahrzeugseitige Datenverarbeitung
<i>Grundgedanke</i>	Übergang von freiem zu Stop&Go-Verkehr und umgekehrt ist im Frequenzspektrum einer Geschwindigkeitsganglinie anhand der Verteilung der Frequenzen erkennbar
<i>Kommunikation</i>	Offline
<i>Datenbasis</i>	Momentangeschwindigkeit, Position
<i>DV Fahrzeug</i>	Frequenztransformation + Ganglinienanalyse – Indikatoren – Fuzzy-Inferenz – Störungsfaktor
<i>Zwischengröße up-link</i>	Störungswahrscheinlichkeit
<i>Ortsbezug ZG up-link</i>	Position
<i>DV Empfänger</i>	-
<i>Zwischengröße down-link</i>	-

Tabelle 5: Profil Frequenzdomänenverfahren

2.2.3.3.2 Verfahrensbeschreibung

Der Grundgedanke des Verfahrens leitete sich aus Beobachtungen des Feldversuchs ab: eine typische Störungseinfahrt zeigte im zeitlichen Verlauf einen Übergang von freiem Verkehr mit geringen Schwankungen der Geschwindigkeitswerte um ein hohes Geschwindigkeitsniveau zu Stop&Go-Verkehr mit sehr hohen Schwankungen um ein niedriges Geschwindigkeitsniveau¹⁰ bis hin zu einem völligen Erliegen des Verkehrs mit einem Geschwindigkeitsniveau nahe Null. Eine Störungseinfahrt wurde also durch Geschwindigkeitsganglinien mit hoher „Unruhe“, d.h. Schwankungen eingeleitet. Diese Unruhe wurde für die Erkennung von Störungseinfahrten verwendet.

Das Verfahren ging von folgender Datenbasis aus:

- Momentangeschwindigkeit
- Position

Die fahrzeugseitige Datenverarbeitung wurde als dreistufiger Prozess definiert:

- 1) Vorverarbeitung der Datenbasis zu Kenngrößen
- 2) Ableiten von Indikatoren durch Parametrisieren der Kenngrößen
- 3) Erzeugen der Ausgangsgrößen *Störungsfaktor* und *Faktor für freien Stadtverkehr* durch Zusammenführen der Indikatoren in logischen Regeln

¹⁰ In den untersuchten Daten hatte dichter oder synchronisierter Verkehr gegenüber Stop&Go-Verkehr in Bezug auf die hier betrachteten Größen eine ähnliche Charakteristik wie freier Verkehr: geringere Schwankungen der Geschwindigkeitswerte. Daher wurde für die weiteren Betrachtungen dichter oder synchronisierter Verkehr nicht weiter betrachtet.

2.2.3.3.2.1 Vorverarbeitung der Datenbasis zu Kenngrößen

Eine Geschwindigkeitsganglinie als Historie von Momentangeschwindigkeiten wurde als Signal in der Zeitdomäne betrachtet unter Verwendung der Fast Fourier Transformation¹¹ in die Frequenzdomäne überführt. Aus der Frequenzdomäne konnten die enthaltenen Frequenzanteile mit ihren Amplituden¹² – das Frequenzspektrum – abgelesen werden. Je mehr eine Geschwindigkeitsganglinie in der Zeitdomäne schwankte, desto höher wurden die Amplituden der höheren Frequenzen. Die Unruhe des Verkehrs konnte durch diese höherfrequenten Anteile sehr gut abgebildet werden.

Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 6 beispielhafte Geschwindigkeitsganglinien aus dem Feldversuch in der Zeit- und Frequenzdomäne dargestellt. Die Diagramme im oberen Teil der Abbildung zeigen die Zeitdomäne als Geschwindigkeit über die Zeit, in den Diagrammen darunter ist die Frequenzdomäne als Amplitude bei der jeweiligen Frequenz zu sehen.

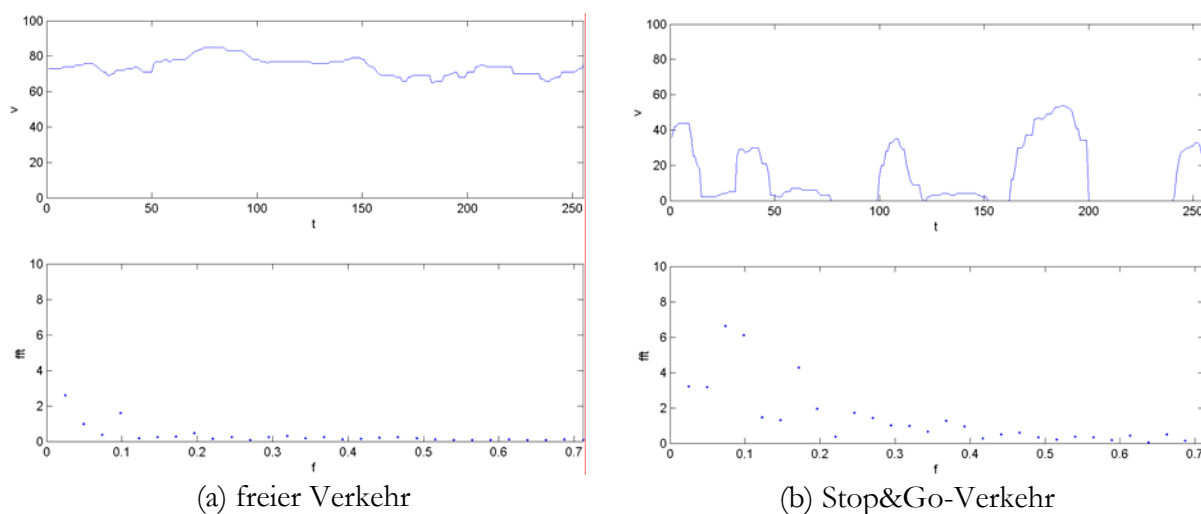


Abbildung 6: Zeit- und Frequenzdomäne von Geschwindigkeitsganglinien ([LAM03], Evaluationssoftware)

Im Fall (a) *freier Verkehr* ist in der Zeitdomäne eine Geschwindigkeitsganglinie mit deutlichen Schwankungen, aber auf hohem Geschwindigkeitsniveau zu sehen, die im Feldversuch manuell¹³ noch als freier Verkehr erkannt wurde. Trotz der Schwankungen sind in der Frequenzdomäne bei höheren Frequenzen nur geringe Amplituden zu sehen. Im Fall (b) *Stop&Go-Verkehr* hingegen sind für den in der Zeitdomäne dargestellten Stop&Go-Verlauf in der Frequenzdomäne deutliche Ausschläge der Amplituden höherer Frequenzen zu verzeichnen.

¹¹ Nach der Theorie der Fourier Transformation kann ein Signal in der Zeitdomäne durch Superposition von Grundschwingungen aus verschiedenen Frequenzen zusammengesetzt werden. Die Fast Fourier Transformation stellt eine zeiteffiziente Methode zur Extraktion dieser Frequenzen aus einer Geschwindigkeitsganglinie der Zeitdomäne dar. Für weitergehende Detailinformationen sei auf [LAM03] verwiesen.

¹² Die Frequenzen liegen in Form komplexer Zahlen vor, mit Amplitude einer Frequenz sei im Folgenden der Betrag der komplexen Frequenz gemeint.

¹³ Um das Verfahren validieren zu können, wurden im Feldversuch parallel zur Aufzeichnung der Geschwindigkeitsganglinien und den zugehörigen GPS-Positionen manuell über eine vom Fahrer zu bedienende Tastatur Verkehrszustände protokolliert, die den aktuellen Verkehrszustand (Pause, frei, dicht, gestaut) identifizierten.

Die Frequenz Null nimmt in dieser Betrachtung eine Sonderstellung ein: ihre Amplitude stellt die Durchschnittsgeschwindigkeit im betrachteten Zeitfenster dar. Sie ist in der gewählten Skalierung in keinem der beiden Fälle in Abbildung 6 zu sehen, wird jedoch noch für die Kenngrößen von Bedeutung sein.

Aufbauend auf dem Frequenzspektrum wurden zwei primäre Kenngrößen definiert:

- Repräsentative Frequenz
- Gesamtleistung des Frequenzspektrums

Zur quantitativen Abbildung der Unruhe des Verkehrs wurde die repräsentative Frequenz nach Formel 8 berechnet. Sie bildete das gewichtete Mittel aller Frequenzen größer Null, als Gewichte wurden die Amplituden verwendet.

$$rF = \frac{\sum_{k=1}^{\frac{N}{2}-1} f(k)|X(k)|}{\sum_{k=1}^{\frac{N}{2}-1} |X(k)|}$$

mit

rF	<i>Repräsentative Frequenz</i>
N	<i>Anzahl der Frequenzen¹⁴</i>
$f(k)$	<i>Frequenz k</i>
$ X(k) $	<i>Betrag der komplexen Amplitude¹² der Frequenz k</i>

Formel 8: Repräsentative Frequenz

Hohe Amplituden bei hohen Frequenzen verschoben die repräsentative Frequenz in Richtung höherer Frequenzbereiche, wohingegen wenig Unruhe im Verkehr zu hohen Amplituden bei niedrigen Frequenzen und somit zu einer niedrigen repräsentativen Frequenz führte.

Für die Identifikation einer Störungseinfahrt wurde neben der Unruhe des Verkehrs gedanklich auch die im betrachteten Fahrzeug enthaltene kinetische Energie berücksichtigt: je höher das Geschwindigkeitsniveau und die Änderungen der Geschwindigkeiten, desto höher die zur Erreichung der verschiedenen Niveaus aufzubringende Energie. Betrachtete man die Geschwindigkeitsganglinie in der Frequenzdomäne als Signal, so verhielt sich die Leistung dieses Signals proportional zur gesuchten Energie. Unter dieser Annahme wurde als zweite primäre Kenngröße die Gesamtleistung des Frequenzspektrums nach Formel 9 als Summe der Amplitudenquadrate aller Frequenzen definiert, also einschließlich der Frequenz Null, die die Durchschnittsgeschwindigkeit und damit das Geschwindigkeitsniveau repräsentierte.

¹⁴ Durch die Fourier Transformation entsteht ein am Ursprung gespiegeltes Frequenzspektrum. In der ersten Hälfte des Spektrums ist bereits die gesamte Information enthalten, daher wird als Obergrenze der Summation nur die Hälfte der Frequenzwerte angesetzt.

$$gLS = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} |X(k)|^2$$

mit

gLS	<i>Gesamtleistung des Frequenzspektrums</i>
N	<i>Anzahl der Frequenzen¹⁴</i>
$ X(k) $	<i>Betrag der komplexen Amplitude¹² der Frequenz k</i>

Formel 9: Gesamtleistung des Frequenzspektrums

Eine quantitative Erfassung des anfangs erwähnten charakteristischen Verlaufs einer Störungseinfahrt wurde damit ermöglicht. In städtischen Verkehrsnetzen gab es jedoch eine zusätzliche Anforderung: strukturbedingt notwendige Halte an Lichtsignalanlagen oder Kreuzungspunkten. Diese Halte erzeugten unter freien Verkehrsbedingungen Geschwindigkeitsganglinien, die mit außerstädtischen Stop&Go-Ganglinien korrelierten. Folgende drei sekundäre Kriterien wurden benutzt, um diesen Sonderfall zu erkennen:

- Maximale Standzeit
- Fahrzeitverhältnis
- Durchschnittsgeschwindigkeit

Innerhalb der betrachteten Ganglinie gab die maximale Standzeit die Dauer des längsten zusammenhängenden Zeitintervalls an, in dem das Fahrzeug stillstand und das Fahrzeitverhältnis das Verhältnis der Anzahl der Geschwindigkeitswerte ungleich Null, bezogen auf die Anzahl aller Geschwindigkeitswerte. Die Durchschnittsgeschwindigkeit musste nicht berechnet werden, da sie direkt aus dem Frequenzspektrum als Amplitude der Frequenz Null abgelesen werden konnte.

2.2.3.3.2.2 *Ableiten von Indikatoren*

Um aus den Kenngrößen aussagefähige Indikatoren ableiten zu können, mussten für jede Kenngröße Wertebereiche und ihre jeweilige Bedeutung definiert werden. Die Grenzen der Wertebereiche wurden nach einer Plausibilitätsprüfung aus den empirischen Daten des Feldversuchs ermittelt. Die Indikatoren wurden so gewählt, dass jedem von ihnen eine umgangssprachliche Bedeutung wie niedrig, mittel, hoch oder sehr hoch zugeordnet werden konnte. Folgende Indikatoren mit den Kenngrößen, aus denen sie sich ableiteten, ergaben sich dabei:

- | | |
|---------------------------|--------------------------------------|
| ▪ Frequenzniveau: | repräsentative Frequenz |
| ▪ Leistungsniveau: | Gesamtleistung des Frequenzspektrums |
| ▪ Längster Halt: | maximale Standzeit |
| ▪ Freiflussverhältnis: | Fahrzeitverhältnis |
| ▪ Geschwindigkeitsniveau: | Durchschnittsgeschwindigkeit |

2.2.3.3.2.3 *Erzeugen der Ausgangsgrößen*

Diese Indikatoren wurden im letzten Schritt durch logische Regeln in einer Fuzzy-Inferenz zusammengeführt, deren Ausgabe die beiden Ausgangsgrößen *Störungsfaktor* und *Faktor für freien*

Stadtverkehr bildeten. Die Indikatoren wurden dabei kontinuierlich über ein gleitendes Zeitfenster berechnet, sodass die Ausgangsgrößen sekundlich aktuelle Werte liefern konnten.

Die Indikatoren Frequenzniveau und Leistungsniveau waren für die quantitative Einschätzung des Verkehrsablaufs zuständig und mündeten in der Ausgangsgröße *Störungsfaktor*. Für den *Faktor für freien Stadtverkehr* arbeiteten die Indikatoren Längster Halt, Freiflussverhältnis und Geschwindigkeitsniveau derart zusammen, dass sie jeweils unterschiedliche Aspekte städtischen freien Verkehrs abbildeten und es so der Fuzzy-Inferenz ermöglichten, den *Störungsfaktor* im Falle des freien Stadtverkehrs zu korrigieren.

Da der *Störungsfaktor* kontinuierlich berechnet und korrigiert wurde, konnte an ihm nicht nur eine Störungseinfahrt abgelesen werden, sondern der gesamte Ablauf des Verkehrsgeschehens von freiem Verkehr, Störungseinfahrt, Störung und Störungsausfahrt. Er konnte somit als Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein einer Störung im aktuellen Zeitfenster interpretiert werden und in dieser Form ereignisorientiert an Empfänger versendet werden.

Beispiele für den *Störungsfaktor* in verschiedenen Verkehrszuständen sind in Abbildung 7, Abbildung 8 und Abbildung 9 zu sehen. Das obere Diagramm stellt jeweils die Geschwindigkeitsganglinie in der Zeitdomäne dar, das mittlere den vom Fahrer manuell aufgezeichneten Verkehrszustand ts (traffic state: 1=frei, 2=dicht, 3=gestaut) und im unteren Diagramm ist der *Störungsfaktor* dF (disturbance factor) zu sehen. Auf jeder Abszisse ist der Zeitindex aufgetragen.

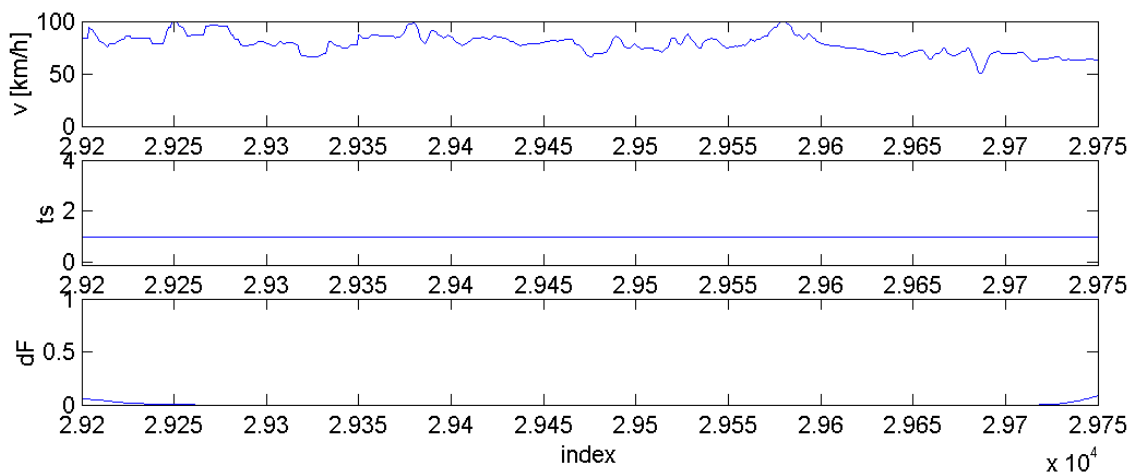


Abbildung 7: Störungsfaktor für außerstädtischen freien Verkehr [LAM03]

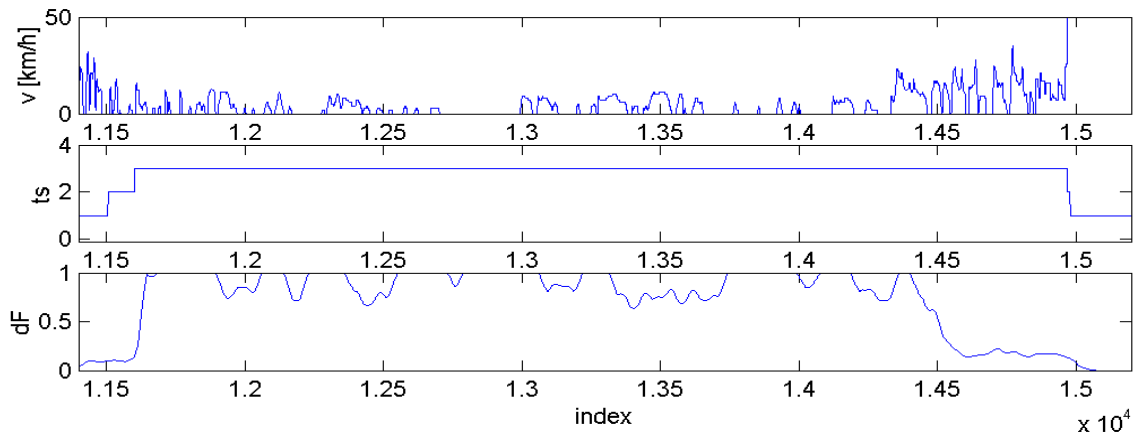


Abbildung 8: Störungsfaktor für eine außerstädtische Störung [LAM03]

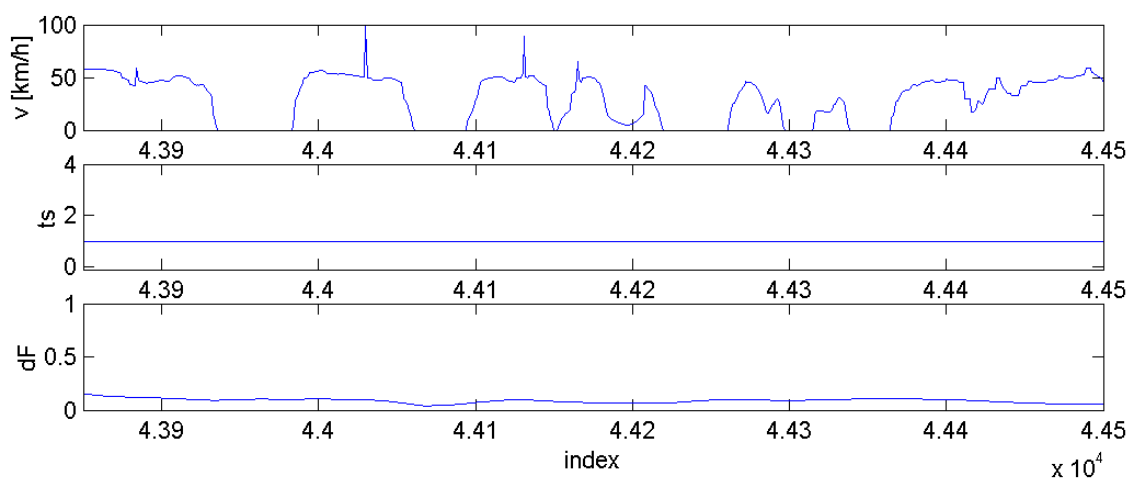


Abbildung 9: Störungsfaktor für freien Stadtverkehr [LAM03]

Für außerstädtischen Verkehr wurde sowohl freier Verkehr als auch Störung zuverlässig erkannt. Für das in Abbildung 7 durchaus als grenzwertig zu bezeichnende Beispiel für freien Verkehr ist anzumerken, dass die Geschwindigkeitsganglinie auch dichten Verkehr charakterisieren könnte, was aber durch den vom Fahrer aufgezeichneten freien Verkehrszustand widerlegt wurde und außerdem für die Betrachtung einer Störungseinfahrt auch nicht relevant wäre. Es zeigt sich, dass selbst für diesen Fall die Ausgangsgröße *Störungsfaktor* erwartungsgemäß keine Störungseinfahrt anzeigte.

Die Korrektur für freien Stadtverkehr erfolgte trotz den in Abbildung 9 in der Geschwindigkeitsganglinie dargestellten Spitzen. Diese waren durch kurzfristige Fehler der über GPS aufgezeichneten Geschwindigkeitswerte bedingt.

Es traten jedoch auch Fehlinterpretationen in Fällen auf, in denen die Korrektur für den freien Stadtverkehr irrtümlicherweise eine Störung auf einer außerstädtischen Straße unterdrückte. Dies ist in Abbildung 8 ab Zeitindex 1.45 zu beobachten, wo die Auflösung einer außerstädtischen Störung von der Fuzzy-Inferenz als freier Stadtverkehr interpretiert wurde und den Störungsfaktor korrigierte. Informationen von einer digitalen Karte über die aktuelle Art des befahrenen Verkehrsnetzes könnten hier Abhilfe schaffen, waren aber in den Versuchsträgern des Feldversuchs nicht verfügbar.

2.2.3.4 Self Organizing Traffic Information System

Das Verfahren „Self Organizing Traffic Information System“ (SOTIS) ([WIS03a], [WIS03b], [WIS04]) wurde im Rahmen des Projekts „FleetNet“ [BMB02] unter dem Namen „Decentralized Floating Car Data“ (DFCD) entwickelt. Der Grundgedanke des Verfahrens war es, reine Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation zu verwenden, um in jedem Fahrzeug eine lokale Verkehrslage in Form segmentbezogener Durchschnittsgeschwindigkeiten zu rekonstruieren und diese fortwährend mit anderen Fahrzeugen abzugleichen. Mit dem Ziel einer möglichst effizienten und schnellen Informationsverbreitung wurde der Schwerpunkt der Verfahrensentwicklung auf das Optimieren des Informationsaustausches über die zugrunde liegende Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation gelegt.

Getestet wurde das Verfahren in numerischen Simulationen und in einem kleinen prototypischen Test im realen Umfeld¹⁵. Das Verfahren scheint prinzipiell für den Transport beliebiger Meldungsinhalte in verschiedenen Netzarten geeignet zu sein, gezeigt wurde es jedoch auf einzelnen Autobahnsegmenten für einfache Durchschnittsgeschwindigkeiten als Meldungsinhalte. Daher wird als Einsatzgebiet Autobahn festgelegt.

2.2.3.4.1 Profil

<i>Zielanwendung</i>	Rekonstruktion der Verkehrslage
<i>Einsatzgebiet</i>	Autobahn
<i>Schwerpunkt</i>	Optimieren des Informationsaustausches über die Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation
<i>Grundgedanke</i>	Erzeugen einer lokalen Verkehrslage in Form segmentbezogener Durchschnittsgeschwindigkeiten unter Verwendung reiner Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation sowohl für die Ermittlung der Durchschnittsgeschwindigkeiten als auch für die Nachrichtenweiterleitung
<i>Kommunikation</i>	Dezentral (up-link: broadcast, down-link: broadcast)
<i>Datenbasis</i>	Momentangeschwindigkeit, Position, Zeitstempel
<i>DV Fahrzeug</i>	-
<i>Zwischengröße up-link</i>	Wissensbasis
<i>Ortsbezug ZG up-link</i>	Strecke
<i>DV Empfänger</i>	Durchschnittsgeschwindigkeitsbildung aller empfangenen Fahrzeuggeschwindigkeiten im Segment – Aktualisierung der Wissensbasis
<i>Zwischengröße down-link</i>	Wissensbasis

Tabelle 6: Profil SOTIS

¹⁵ Als Übertragungstechnologie wurde aus Kostengründen WLAN mit einer Übertragungreichweite von etwa 500m verwendet [WIS04]. Für FleetNet wurde UTRA TDD (UMTS Terrestrial Radio Access Time Division Duplex) für adhoc-Kommunikation modifiziert und mit einer Reichweite von ca. 1000m angegeben [WIS03b].

2.2.3.4.2 Verfahrensbeschreibung

Im Fahrzeug wurde folgende Datenbasis festgelegt:

- Momentangeschwindigkeit
- Position
- Zeitstempel

Basierend auf diesen Daten erzeugten die Fahrzeuge selbst lokal begrenzte Verkehrslagen, deren Größe durch einen vorgegebenen Umkreis¹⁶ um die aktuelle Position beschränkt wurde. Aufgrund der Fahrzeugbewegung kamen in diesem Umkreis im Zeitverlauf unterschiedliche Segmente¹⁷ zu liegen, sodass die Verkehrslage permanent durch Hinzufügen von Segmenten innerhalb oder Löschen von Segmenten außerhalb des Umkreises aktualisiert werden musste. Die Verkehrslage wurde segmentbezogen in Form des Durchschnitts der Momentangeschwindigkeiten der Fahrzeuge in diesem Segment in einer fahrzeugseitigen Wissensbasis gespeichert. Zusätzlich wurde jeder Eintrag mit einem Zeitstempel versehen, der den Zeitpunkt der Berechnung dieser Durchschnittsgeschwindigkeit markierte. Diese Wissensbasis wurde über Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation fortwährend mit anderen Fahrzeugen abgeglichen.

Die fahrzeugseitige Datenverarbeitung beschränkte sich auf der Ermittlung der Momentangeschwindigkeit mit der zugehörigen Position¹⁸ und dem Zeitpunkt der Ermittlung. Zu Beginn besaß ein Fahrzeug noch kein Wissen über andere Segmente, sodass die Wissensbasis leer war. Zum Nachrichtenversand wurde ein Protokoll spezifiziert, das im Header die ermittelte Momentangeschwindigkeit, Position und Zeit und in der Payload – dem Rest der Nachricht – die Wissensbasis enthielt¹⁹. Eine Nachricht im Format dieses Protokolls wurde nun an die Fahrzeuge in Übertragungsbereichweite versendet.

Ein empfangendes Fahrzeug wertete die Nachricht zweifach aus: für das gegenwärtig befahrene Segment und für alle anderen Segmente innerhalb des vorgegebenen Umkreises. Für das gegenwärtig befahrene Segment wurden die Informationen im Header ausgewertet: alle Momentangeschwindigkeiten von Fahrzeugen im selben Segment wie das empfangende Fahrzeug wurden mit dessen Momentangeschwindigkeit in eine Durchschnittsgeschwindigkeit des Segments überführt, die dann mit Positionsangabe und Zeitstempel in die Wissensbasis für das gegenwärtig befahrene Segment aufgenommen werden konnte. Für alle anderen Segmente wurde pro Segment überprüft, ob in der Nachricht durch den zugehörigen Zeitstempel aktuellere Durchschnittsgeschwindigkeitswerte angezeigt wurden. Im Positivfall wurden für das betrachtete Segment die Durchschnittsgeschwindigkeit und der Zeitstempel in der Wissensbasis aktualisiert.

¹⁶ In [WIS03b] wird ein Umkreis von max. 100km angegeben.

¹⁷ Straßen wurden IDs zugeteilt und in Segmente fester Länge von 500m unterteilt.

¹⁸ Die Position konnte in Form von WGS84-Koordinaten (Tupel aus Längen- und Breitengrad) oder durch Angabe einer Straßen-ID und einer eindimensionalen Position darin angegeben werden.

¹⁹ Für die Payload wurde optional ein Format für „Notfallnachrichten“ definiert. Weiterführende Informationen beschränkten sich auf einen kurzen, allgemein gehaltenen Absatz, weswegen diese Option im Weiteren nicht mehr berücksichtigt wird.

Die Wissensbasis wurde schließlich wieder an andere Fahrzeuge versendet²⁰. Die genaue Funktionsweise der Nachrichtenweiterleitung ist in Abbildung 10 und Abbildung 11 anhand eines einfachen Autobahnabschnitts illustriert.

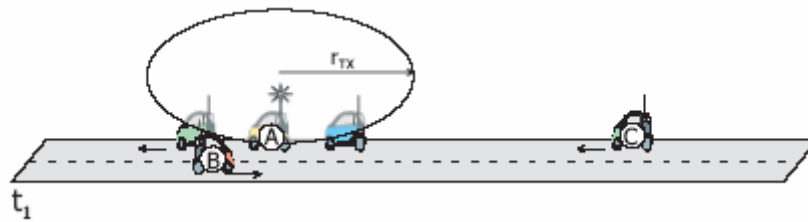


Abbildung 10: Nachrichtenweiterleitung, Zeitpunkt t_1 ([WIS03a], vereinfacht)

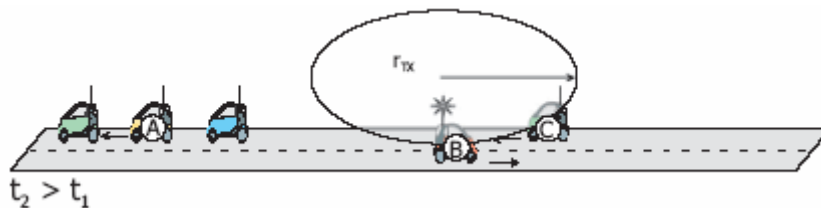


Abbildung 11: Nachrichtenweiterleitung, Zeitpunkt t_2 ([WIS03a], vereinfacht)

Zum Zeitpunkt t_1 versendet Fahrzeug A seine Wissensbasis an alle Fahrzeuge innerhalb der Übertragungsbereichweite r_{TX} . Fahrzeug C kann zu diesem Zeitpunkt nicht erreicht werden, jedoch kann Fahrzeug B seine Wissensbasis mit der Wissensbasis des Fahrzeugs A aktualisieren. Für Fahrzeug B sei in dem beschriebenen Autobahnszenario die von Fahrzeug A erhaltene Information nicht von Interesse, doch führt die aktualisierte Wissensbasis von Fahrzeug B zum späteren Zeitpunkt t_2 dazu, dass Fahrzeug C über die Wissensbasis von Fahrzeug B die zum Zeitpunkt t_1 versendeten Informationen von Fahrzeug A erhält und damit seine eigene Wissensbasis aktualisieren kann. Fahrzeug B fungierte damit in dem beschriebenen Szenario lediglich als Bote.

In den durchgeführten Simulationen wurden folgende kritische Kommunikationsparameter untersucht:

- Übertragungsbereichweite
- Aktualisierungszeitintervall
- Ausstattungsrate

Eine große Übertragungsbereichweite und ein kleines Aktualisierungszeitintervall – das Zeitintervall zwischen zwei Nachrichtenübertragungen – wurden für Verkehrssituationen mit geringen

²⁰ Diese Vorgehensweise, Nachrichten nur von Fahrzeug zu Fahrzeug weiterzureichen, um sie dort auszuwerten, bezeichnet man in der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation als Single-Hop-Kommunikation. Im Gegensatz dazu spricht man bei einer Vorgehensweise, bei der Fahrzeuge auch als Zwischenstationen agieren, d.h. Nachrichten nicht selbst auswerten, sondern zu einem entfernten Fahrzeug weiterleiten, als Multi-Hop-Kommunikation. Die Entscheidung für Single-Hop-Kommunikation wurde mit einer Studie begründet, die Multi-Hop-Kommunikation eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Nachrichtenzustellung bei geringen Verkehrsdichten bescheinigte (Fußnote 4 in [WIS03a], S.2).

Verkehrsdichten als vorteilhaft erklärt, in Situationen mit hohen Verkehrsdichten führten beide so gewählten Parameter jedoch zu einer Abnahme der verfügbaren Bandbreite für die Nachrichtenübertragung und erhöhten das Risiko einer Überlastung des Datenübertragungskanal.

Unter der Annahme, dass in Situationen mit hohen Verkehrsdichten eine Reduktion der Übertragungsreichweite die verfügbare Bandbreite nicht signifikant senken könnte, konzentrierten sich die Untersuchungen in [WIS03b] auf eine intelligente Anpassung des Aktualisierungszeitintervalls des Nachrichtenversands. Die zugrunde liegende Idee sollte empfangene Nachrichten, deren Inhalt sich wesentlich von der eigenen Wissensbasis unterschied, bevorzugen und schneller verbreiten, jedoch Nachrichten, die der eigenen Wissensbasis sehr ähnelten, verzögern. Dazu wurde für jede empfangene Nachricht ein Nachrichtengewicht berechnet, das für alle darin enthaltenen Segmente sowohl Abweichungen des Zeitstempels, als auch der Durchschnittsgeschwindigkeit – wenn auch in unterschiedlicher Gewichtung – berechnet und anschließend über alle enthaltenen Segmente aufsummiert. Unterschritt dieses Nachrichtengewicht einen Schwellwert w_1 wurde das Aktualisierungszeitintervall erhöht, überschritt es im Gegenzug einen Schwellwert $w_2 > w_1$, so wurde das Zeitintervall verkürzt.

Zusätzlich zu w_1 und w_2 wurde ein Distanzgewicht definiert, das anhand der Positionsinformation im Header einer empfangenen Nachricht die Distanz des Empfängers zum Sender bestimmt. Überschritt diese Distanz einen Schwellwert D_{TX} , wurde das Zeitintervall ebenfalls verkürzt, sodass weiter entfernte Fahrzeuge zuerst senden. Damit konnte erreicht werden, dass große Übertragungsdistanzen zwischen zwei sendenden Fahrzeugen gegenüber kleinen bevorzugt wurden, was die Verbreitungsgeschwindigkeit von Nachrichten zusätzlich erhöhen konnte.

Die Ausstattungsrate von Fahrzeugen mit dem SOTIS-Verfahren, bezogen auf die Gesamtanzahl der Fahrzeuge wurde in [WIS04] untersucht.

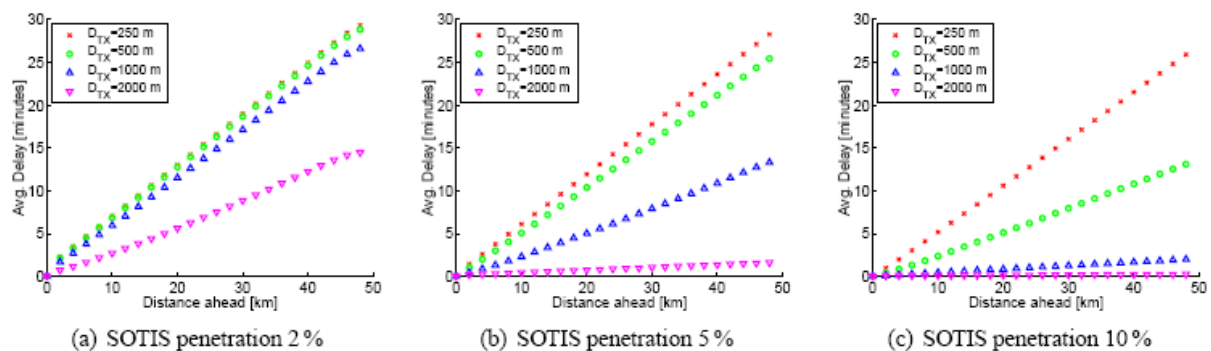


Abbildung 12: Informationsverzögerung in Abhängigkeit der Ausstattungsrate [WIS04]

Wie aus Abbildung 12 ersichtlich, wurde die zeitliche Verzögerung einer Information in Abhängigkeit zur Distanz zum erstmaligen Versenden dieser Information ermittelt. Als Parameter wurden die Übertragungsreichweite D_{TX} und Ausstattungsraten von 2% (a), 5% (b) und 10% (c) verwendet. Interessant dabei ist der Einfluss der D_{TX} -Werte 250m, 500m und 1000m auf die Informationsverzögerung. Im Fall (a) ist kaum ein signifikanter Einfluss von D_{TX} auf die Informationsverzögerung ersichtlich, im Fall (b) und besonders im Fall (c) jedoch wird

der Einfluss dominant. Erklärt werden kann dies durch ein Überwiegen von direkter Kommunikation zwischen zwei Fahrzeugen für Fälle mit hohen Ausstattungsraten, was den starken Einfluss der Übertragungreichweite auf die Informationsverzögerung erklärt. Im Fall (a) ist jedoch die Ausstattungsrate dermaßen gering, dass die direkte Kommunikation zur Seltenheit wird und die Nachrichtenweiterleitung über andere Fahrzeuge als Boten überwiegt, wodurch die Übertragungreichweite einer einzelnen, direkten Datenübertragung an Bedeutung verliert.

2.2.3.5 Taxi-FCD

Dieses Verfahren [SCF03] verwendete die in Taxi-Zentralen über Betriebsfunk einlaufenden Daten ihrer Fahrzeuge, um daraus eine innerstädtische Verkehrslage zu rekonstruieren. Da die Taxi-Zentralen diese Daten für Dispositionszwecke ohnehin in zeitlichen Abständen bis zu viermal pro Minute von ihren Taxis empfangen, mussten die Kommunikationskosten nicht berücksichtigt werden. Als Konsequenz wurde die sonst essentielle Anforderung nach einem möglichst geringen Meldeaufkommen ignoriert und ein Verfahren entwickelt, das sich als Schwerpunkt in der empfängerseitigen Datenverarbeitung auf die Nutzung dieser großen Menge an vorhandenen Daten²¹ zur Ableitung von segmentbezogenen Reisegeschwindigkeiten konzentriert.

2.2.3.5.1 Profil

<i>Zielanwendung</i>	Rekonstruktion der Verkehrslage
<i>Einsatzgebiet</i>	Stadt
<i>Schwerpunkt</i>	Empfängerseitige Datenverarbeitung
<i>Grundgedanke</i>	Verkehrslage ist durch aus Taxi-Daten gewonnenen segmentbezogenen Reisegeschwindigkeiten erzeugbar
<i>Kommunikation</i>	Zentral (up-link: Punkt-zu-Punkt, down-link: -)
<i>Datenbasis</i>	Position, Zeitstempel, Status, Fahrzeugkennung
<i>DV Fahrzeug</i>	-
<i>Zwischengröße up-link</i>	Position, Zeitstempel, Status, Fahrzeugkennung
<i>Ortsbezug ZG up-link</i>	Strecke
<i>DV Empfänger</i>	Rekonstruktion des Fahrtablaufs – segmentbezogene Durchschnittsgeschwindigkeitsbildung
<i>Zwischengröße down-link</i>	-

Tabelle 7: Profil Taxi-FCD

²¹ Es besteht Grund zu der Annahme, dass Daten der Taxi-Zentralen kostenlos zur Verfügung standen. Sollte sich dies nach einer eventuellen Etablierung des Verfahrens ändern, wäre eine mögliche Auswirkung eine drastische Verkleinerung der vorhandenen Datenmenge, was die Frage aufwirft, ob die getroffenen Aussagen dann noch gültig sind.

2.2.3.5.2 Verfahrensbeschreibung

Die fahrzeugseitige Datenbasis war durch folgende Größen gegeben:

- Position
- Zeitstempel
- Status
- Fahrzeugkennung

Jedes Fahrzeug ermittelte im Rahmen seiner Taxi-Funktion bis zu viermal in der Minute seine Position über GPS, um diese für Dispositionszwecke mit seinem vom Fahrer manuell eingegebenen aktuellen Status (frei, besetzt, wartend, etc.) und seiner Fahrzeugkennung an die Taxi-Zentrale zu senden. Diese Daten wurden ohne weitere fahrzeugseitige Verarbeitung für Taxi-FCD verwendet und über das eigene Betriebsfunknetz an die Taxi-Zentrale übermittelt.

Zentraleseitig musste zunächst der Fahrtverlauf für jede Fahrzeugkennung aus den empfangenen GPS-Positionsdaten rekonstruiert werden. Dazu projizierte ein Map-Matching-Verfahren die empfangenen Positionsdaten auf Straßen einer digitalen Straßenkarte. Im nächsten Schritt wurde über ein Routing-Verfahren der wahrscheinliche Wegepfad berechnet. War der Fahrtablauf rekonstruiert, konnten nun durch die den Positionen zugeordneten Zeitstempel für Segmente innerhalb dieses Fahrtablaufs Durchschnittsgeschwindigkeiten berechnet werden. Diese zeitaktuellen Geschwindigkeiten wurden im letzten Schritt noch über einen Zeitraum von dreißig Sekunden gemittelt. Die Statusmeldungen dienten zur Ausfilterung von empfangenen Daten, die anzeigten, dass sich ein Taxi nicht im Verkehrsgeschehen, sondern etwa wartend an einem Taxistand befand.

Über die Verteilung von Verkehrsinformation, basierend auf dieser Verkehrslage in Form segmentbezogener durchschnittlicher Reisegeschwindigkeiten, wurden nur prinzipielle Aussagen getroffen. Es wurde jedoch eine internetbasierte Lösung vorgestellt, die diese Geschwindigkeiten pro Segment für einen Zeitraum von dreißig bzw. sechzig Minuten aggregierte und im einen Fall mit der auf dem Segment maximal zulässigen und im anderen Fall mit aus einer zuvor ermittelten Historie gewonnenen Geschwindigkeit in Beziehung setzte, um daraus einen Level of Service abzuleiten. Des Weiteren wurde ein Emissionsmodell entwickelt, das bestehende Modelle erweiterte, um aus den berechneten Taxi-FCD-Geschwindigkeiten Emissionsmengen ableiten zu können.

Als Nachteil kann genannt werden, dass Taxis im Allgemeinen gestattet ist, Fahrspuren des öffentlichen Verkehrs zu befahren, der eine bevorzugte Behandlung in der Abwicklung seines Verkehrs genießt. Aufgrund dieser Bevorzugung kann der Taxiverkehr nicht mehr repräsentativ für den Individualverkehr werden.

2.2.3.6 Weitere Verfahrensvarianten

Zusätzlich zu den im Abschnitt 2.2.3 im Detail vorgestellten Verfahrensvarianten existieren noch weitere Verfahrensvarianten, von denen in diesem Abschnitt diejenigen aufgeführt werden, die aufgrund der publizierten Detailtiefe nicht nur allgemeine, sondern auch konkrete Informationen enthalten.

[GÖS01] beschäftigte sich ähnlich wie das im Abschnitt 2.2.3.3 beschriebene Verfahren mit der Frequenztransformation, ging jedoch nicht über eine Analyse hinaus. Das an die Analyse anschließend, sehr allgemein beschriebene Verfahren untersuchte die Möglichkeit, Fahrzeuge des ÖPNV als floating cars zu verwenden, verwendete dafür aber keinerlei Frequenztransformation, sondern einfache fahrzeugseitig erfasste Reisezeiten.

2.2.3.6.1 Fusion

In [OFF01] wurde ein Verfahren beschrieben, das für Autobahnnetze fahrzeugseitig erfasste Reisegeschwindigkeiten von floating cars und Daten lokaler Verkehrsdatenerfassung fusionierte. Hierzu wurden aus den Daten der lokalen Messquerschnitte segmentbezogene Reisegeschwindigkeiten geschätzt und gemeinsam mit den fahrzeugseitig erfassten Reisegeschwindigkeiten einer Fuzzy-Inferenz zugeführt. Die Kalibrierungsparameter für die Fuzzy-Inferenz wurden dabei nicht manuell vorgegeben, sondern mit Hilfe eines neuronalen Netzes²² aus historischen Daten gelernt. Insgesamt ergab sich damit ein Neuro-Fuzzy-Modell.

Da widersprüchliche Datensätze in den historischen Daten das neuronale Netz falsch trainieren würden, wurde dem Lernprozess eine Clusteranalyse vorgeschaltet, die anhand vorgegebener Merkmale versuchte, aus den verfügbaren Daten Cluster mit gleichartigen Verkehrszuständen zu extrahieren. Der Lernvorgang wurde immer dann neu angestoßen, wenn im laufenden Betrieb eine ausreichende Menge an Daten empfangen worden war.

Zum Vergleich wurde die Fuzzy-Inferenz manuell kalibriert und mit den Ergebnissen des Neuro-Fuzzy-Modells verglichen. Der Autor kam zu dem Schluss, „*dass beide Systeme die Reisegeschwindigkeit in gleich gutem Maße wiedergeben*“ und dass „*der Einsatz eines reinen Fuzzy-Systems zu empfehlen*“ ist²³.

Ebenfalls Fusion verwendet die DDG (Gesellschaft für Verkehrsdaten mbH), ein privater Dienstleister von Verkehrsinformationen auf dem deutschen Autobahnnetz. In [SCN00] wurden Verfahrensdetails beschrieben, dabei wurden folgenden Datenquellen angeführt:

- Induktionsschleifen in der Fahrbahn
- Stationäre Erfassungssysteme
- Floating Car Data

Die Induktionsschleifen liefern in einem festen Takt lokale Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten. Die stationären Erfassungssysteme sind ein durch die DDG betriebenes Netz von auf Autobahnbrücken montierten Radar-, Infrarot- und Lasersensoren, die über Mobilfunk ereignisorientiert ebenfalls Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten an die DDG versenden. Zusammen mit den mobil erfassten Geschwindigkeiten der floating cars wurden diese drei Datenquellen nach einer zeitlichen und örtlichen Filterung einer Fuzzy-Inferenz zugeführt, die daraus einen Verkehrszustand ableitete. Örtliche Lücken wurden durch Extrapolation,

²² Neuronale Netze versuchen, die Lernfähigkeit des menschlichen Gehirns algorithmisch nachzubilden, das Netz besteht dabei aus Knoten und deren Verbindungen. Beaufschlagt man dieses Netz an den Eingängen mit Trainingsdatensätzen und dem Sollergebnis am Ausgang, kann das Netz die Gewichte der Verbindungen der dazwischenliegenden Knoten „lernen“, die zum Sollergebnis führen. Für weitere Details sei auf [OFF01] verwiesen.

²³ [OFF01], S.188

zeitliche Inkonsistenzen durch Mittelung beseitigt. Die gewonnenen, ortsgenauen Verkehrszustände wurden zu Domänen zusammengefasst und im zeitlichen Verlauf verfolgt.

Darüber hinaus wurde in [FAS97] ein Verfahren vorgestellt, das Teile der zentralseitigen Datenverarbeitung in die Fahrzeuge verlagert und dort mit Hilfe einer Fuzzy-Inferenz Verkehrszustände und im Detail nicht vollständig aufgeführte Zusatzkenngrößen zur Identifikation der Domänen erfasst. Diese Informationen wurden zentralseitig in einem numerischen Netzmodell zur weiteren Verarbeitung zusammengeführt.

2.2.4 Analyse der Verfahrensvarianten

In diesem Abschnitt werden die vorgestellten Verfahrensvarianten einer vergleichenden Analyse unterzogen. Diese Analyse wird in zwei Dimensionen durchgeführt: methodisch und in der implementierungsabhängigen Umsetzung. Jeder Dimension wird im Folgenden ein eigener Abschnitt gewidmet. Als Einschränkung werden die im Abschnitt 2.2.3.6 dargelegten Verfahrensvarianten nicht mitbetrachtet, da sie entweder keine vollständig beschriebenen Verfahren darstellen oder im Fall Fusion ihren Schwerpunkt auf die lokale Verkehrsdatenerfassung legen und somit ebenfalls keine vollständigen FCD-Verfahren umsetzen. Da XFCD als einzige Verfahrensvariante die Zielanwendung lokale Gefahrenwarnung umsetzt, wird des Weiteren für die Analyse dieser Teil von XFCD nicht mitbetrachtet.

2.2.4.1 Methodik

Analysiert man die vorgestellten Verfahren hinsichtlich ihrer methodischen Unterschiede, identifizieren folgende Merkmale die methodische Seite einer Verfahrensvariante:

- Ortsbezug
- Implizite Störungsdefinition
- Einsatzgebiet

Die Verfahren XFCD und das Frequenzdomänenverfahren haben einen positionsgenauen **Ortsbezug** von Störungsflanken zum Ziel. Diese Forderung hat als direkte Auswirkung ein deutliches Ansteigen des fahrzeugseitigen Datenverarbeitungsanteils zur Folge, da die positionsgenaue Erkennung von Störungsflanke sehr hohe Anforderungen an die fahrzeugseitige Algorithmik stellt. Demgegenüber ist eine fahrzeugseitige Aufzeichnung einer Reisezeit oder Durchschnittsgeschwindigkeit für ein bestimmtes Segment bei den Verfahren mit streckengenauem Ortsbezug als vergleichsweise einfach anzusehen, wodurch sich bei den Verfahrensvarianten City-FCD, SOTIS und Taxi-FCD der Schwerpunkt der Datenverarbeitung auf die Empfängerseite verlagert.

Darüber hinaus ist auch ein Zusammenhang zwischen dem Ortsbezug und dem fahrzeugseitig entstehenden Meldeaufkommen festzustellen. Da die positionsgenauen Verfahren Störungsflanken erkennen, melden diese nur bei Auftreten eines meldungswürdigen Ereignisses. Sind streckengenau Verfahren hingegen so ausgelegt, dass sie periodisch oder jeweils am Ende des betrachteten Segments die berechnete Reisezeit oder Durchschnittsgeschwindigkeit versenden, entsteht ein deutlich höheres Meldeaufkommen als bei den positionsgenauen

Verfahren. Dies ist bei der Verfahrensvariante Taxi-FCD zu beobachten. City-FCD und SOTIS haben diesen Umstand bereits berücksichtigt und versuchen das Meldeverhalten durch ein Erhöhen des fahrzeugseitigen Datenverarbeitungsanteils in Form von Schwellwertvergleichen ereignisorientiert zu gestalten. Sie können dadurch jedoch nicht positionsgenau werden, da sich die aufgezeichneten Daten immer auf eine Strecke beziehen und daher erst nach Durchfahren dieser Strecke berechnet werden können.

Als weiteres signifikantes Unterscheidungsmerkmal kann die **implizite Störungsdefinition** eines Verfahrens angeführt werden, die in jedem Verfahren mit Ausnahme von SOTIS enthalten und algorithmisch umgesetzt wurde. Tabelle 8 zeigt eine Gegenüberstellung dieser Definitionen, die nicht explizit in den Publikationen angeführt werden, sondern aus der algorithmischen Beschreibung rekonstruiert werden können.

Verfahrensvariante	Implizite Störungsdefinition
XFCD	Bereich niedrigen Geschwindigkeitsniveaus
City-FCD	Bereich erhöhter Reisezeit
Frequenzdomänenverfahren	Bereich zwischen zwei Phasen hoher Unruhe im Verkehrsablauf mit niedrigem Geschwindigkeitsniveau
SOTIS	-
Taxi-FCD	Bereich niedrigen Geschwindigkeitsniveaus

Tabelle 8: Implizite Störungsdefinitionen der Verfahrensvarianten

XFCD und Taxi-FCD verwenden die gleiche implizite Störungsdefinition, indem sie einen Bereich zu erkennen versuchen, der durch ein niedriges Geschwindigkeitsniveau gekennzeichnet ist. Sie unterscheiden sich im Niveau, das niedrig von nicht-niedrig unterscheidet: in XFCD eine feste Grenze von 75 km/h, in Taxi-FCD zwei nicht näher beschriebene Schwellenwerte, die sich zum einen aus der maximal zulässigen Geschwindigkeit und zum anderen aus historischen Daten ableiten.

Das Frequenzdomänenverfahren erkennt den Bereich zwischen zwei Phasen mit hoher Unruhe im Verkehrsablauf als Störung, der zusätzlich dadurch gekennzeichnet ist, dass das Geschwindigkeitsniveau darin niedrig ist, aber insgesamt nicht dem typischen Verlauf eines innerstädtischen, freien Verkehrsablaufs entspricht.

In City-FCD wird der Bereich als Störung definiert, der durch eine erhöhte Reisezeit ausgezeichnet ist, wobei der genaue Betrag dieser Erhöhung dynamisch durch die Zentrale in Form von Schwellwerten vorgegeben ist.

SOTIS hingegen konzentriert sich auf die Verteilung möglichst aktueller segmentbezogener Durchschnittsgeschwindigkeiten, bewertet diese algorithmisch jedoch nicht, wodurch eine Ableitung einer impliziten Störungsdefinition nicht möglich ist.

Betrachtet man das **Einsatzgebiet** der Verfahren, so fällt auf, dass die Verfahren, die speziell für innerstädtische Verkehrsnetze konzipiert wurden, ausschließlich einen streckengenauen Ortsbezug aufweisen. Aufgrund der im Vergleich zu Autobahnnetzen kürzeren Segmentlängen in Stadtnetzen ermöglicht diese Vorgehensweise eine Umgehung der Problematik der

innerstädtischen Störungsflankenerkennung zum Preis einer verringerten räumlichen Auflösung. Dies gilt für die Varianten City-FCD und Taxi-FCD. Da das ebenfalls streckengenaue SOTIS zwar auf Autobahnnetzen getestet wurde, das Verfahren die darin enthaltenen Straßen jedoch in Segmente von 500m Länge unterteilt, kann dieser Verfahrensvariante prinzipiell auch eine Tauglichkeit für Stadtnetze attestiert werden. Eine Ausnahme bildet hier das Frequenzdomänenverfahren, das zunächst netzunabhängig positionsgenau arbeitet, für Stadtnetze jedoch den Sonderfall freien Verkehr explizit berücksichtigt.

Zusammenfassend sind in Tabelle 9 die diskutierten Unterscheidungsmerkmale gegenübergestellt.

Verfahren	Ortsbezug		Störungsdefinition			Einsatzgebiet	
	Position	Strecke	V-Niveau	Unruhe	Reisezeit	Stadt	Autobahn
XFCD	X		X				X
F.D.V.	X		X	X		X	X
City-FCD		X			X	X	
Taxi-FCD		X	X			X	
SOTIS		X				(x)	X

Tabelle 9: Signifikante Unterscheidungsmerkmale der Verfahrensvarianten

2.2.4.2 Implementierungsabhängige Umsetzung

Abgesehen von den methodischen Unterschieden sind implementierungsabhängig in der Umsetzung deutliche Unterschiede in feinerer Granularität gegeben. Diese wurden bereits anhand der Profile in Abschnitt 2.2.3 erläutert und werden hier nicht weiter vertieft. Zwei Merkmale jedoch nehmen eine Sonderstellung ein und bedürfen zusätzlicher Bemerkungen:

- Datenbasis
- Kommunikationsvariante

Die verwendete **Datenbasis** differiert in den Profilen, sie stellt gewissermaßen die Grundbedingung für die Funktionsfähigkeit eines Verfahrens dar. Aus heutiger Sicht ist in modernen Kraftfahrzeugen bereits zu einem großen Teil mit den meisten der angeführten Daten zu rechnen, dem aktuellen Trend folgend besteht zudem Grund zu der Annahme, dass der automobiler Elektronikanteil weiter steigen wird. Daten wie Geschwindigkeitswerte, Positions- und Zeitdaten sind überdies von jedem GPS-fähigen Gerät abgreifbar. Für Straßenklassen ist ein Gerät mit digitaler Karte notwendig, meist in Form eines Navigationsgerätes. Eine Ausnahme bilden die Daten Status und Fahrzeugkennung von Taxi-FCD. Dies sind Taxi-spezifische Daten und es ist nicht davon auszugehen, dass diese Daten in Fahrzeugen eines anderen Typs verfügbar sein werden. Unter dieser Sichtweise ist bei der Datenbasis daher weniger von einem Unterschied zu sprechen, als vielmehr von einer Gemeinsamkeit unter den FCD-Verfahren.

Die verwendete **Kommunikationsvariante** hat eine besondere Bedeutung. Da jedes FCD-Verfahren Fahrzeuge und einen (zentrale Kommunikation) oder mehrere (dezentrale Kommunikation) Empfänger einschließt, stellt die Kommunikationsvariante nur die Art der Informationsverteilung dar und kann somit unter Beibehaltung der zugrunde liegenden Methodik

verändert werden. Als Konsequenz ergibt sich empfängerseitig eine Veränderung der Informationsdichte, wie die Variante SOTIS mit ihren lokalen Verkehrslagen deutlich gemacht hat. Aus diesem Grund stellt die verwendete Kommunikationsvariante zum einen ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal dar, zum anderen ist sie jedoch prinzipiell unter Berücksichtigung der beschriebenen Auswirkungen austauschbar.

2.2.4.3 Fazit

Die Verfahrensvarianten differieren sowohl in Methodik als auch in besonderem Maße in der Umsetzung. Die Unterschiede und Gemeinsamkeiten wurden soweit möglich in den vorausgegangenen Abschnitten herausgearbeitet, es ergibt sich jedoch ein sehr heterogenes Bild.

Insgesamt ist der technische, implementierungsnahe Blickwinkel dominant, aus dem die Verfahren in verschiedenen großen Feldversuchen getestet wurden. Nicht alle Quellen geben die genaue Anzahl der dabei verwendeten Versuchsfahrzeuge an, es ist jedoch eine Größenordnung ableitbar. Diese zeigt sehr deutlich, dass mit Ausnahme von Taxi-FCD kaum nennenswerte, nach Formel 1 berechnete Ausstattungsrate erzielt werden konnten. Dies ist dadurch zu erklären, dass sich die genannten Arbeiten auf die prinzipielle Machbarkeit der Verfahren konzentrieren und daher kaum Informationen über das Verhalten der Verfahren in Abhängigkeit des wichtigen Parameters Ausstattungsrate vorliegen.

Die Aussagen über erzielbare Ausstattungsrate waren dabei vollständig von den Verfahren getrennt geführten Betrachtungen entnommen. Dort wird mit statistischen Methoden versucht, über Ankunfts-Wahrscheinlichkeiten von Fahrzeugen²⁴ oder Annahmen über die Geschwindigkeitsverteilung im Verkehr²⁵ auf die Ausstattungsrate zu schließen. Daraus sind kaum belastbare Aussagen über die in Abschnitt 2.2.2 beschriebene, direkt proportionale Abhängigkeit der Qualität des Ergebnisses von der Ausstattungsrate ableitbar.

Dieser Mangel an Transparenz der inneren Zusammenhänge verschärft sich, wenn das Verfahren nicht aus dem vorwiegend technischen Blickwinkel betrachtet wird, sondern aus wirtschaftlicher Sicht. In dieser Betrachtungsweise ist der Zusammenhang zwischen der mit einem Verfahren erzielbaren Qualität des Ergebnisses und der dafür aufzuwendenden Kosten von zentraler Bedeutung, beide in Abhängigkeit der Ausstattungsrate. Angaben zu diesen inneren Zusammenhängen sind in einer über die statistischen Schätzungen hinausgehenden Form nicht zu finden.

Als Konsequenz erhebt sich in zweierlei Hinsicht die Forderung nach quantifizierbaren Informationen:

- Verfahren im Vergleich greifbar machen
- Transparenz der inneren Zusammenhänge

²⁴ [HUB01a], S.149

²⁵ [OFF01], S.82

Da die Methodiken der Verfahren stark differieren und damit zu erwarten ist, dass die entstehenden Kosten und die Qualität der Ergebnisse ebenso unterschiedlich ausfallen werden, fehlen quantitative Messgrößen, die die einzelnen Varianten greifbar und damit untereinander vergleichbar machen. Diese Messgrößen können nicht beliebig definiert werden, sondern sind den beschriebenen inneren Zusammenhängen unterworfen und dürfen nicht getrennt betrachtet werden.

3 Methodik der Messung und Analyse in der Verkehrstelematik

Es stellt sich die Frage, was ein Verkehrsinformationssystem basierend auf Floating Car Data für verschiedene Netzarten zu leisten imstande ist. Darauf gibt es zurzeit nur fragmentarisch Antworten. Eine fehlende Standardisierung²⁶ verstärkt die Problematik der Variantenvielfalt der nicht direkt vergleichbaren Verfahren, die zudem einen Mangel an Transparenz der inneren Zusammenhänge aufweisen. Insgesamt herrscht damit ein **Informationsmangel**, nach [WIK06] nicht nur ein Problem von Floating Car Data, sondern der Verkehrstelematik generell:

„Gründe, weshalb die Umsetzung von Verkehrstelematik-Applikationen nur langsam voranschreitet, mag es viele geben. Einer dieser Gründe jedoch ist die Tatsache, dass für derartige Applikationen Informationen benötigt werden – Informationen sowohl über den Verkehrsträger Straße als auch über den Straßenverkehr selbst – die nur selten in der erforderlichen Qualität vorhanden sind.“

Dieser Informationsmangel dehnt sich nicht nur auf die technische Dimension aus, sondern ist auch im wirtschaftlichen Zusammenhang der zur Zielerreichung nötigen Aufwendungen zu finden. Um die eingangs nachgefragte Leistungsfähigkeit ermitteln zu können, bedarf es einer Methodik, die in der Lage ist, den identifizierten Informationsmangel zu beheben. Im Vordergrund steht dabei die Vermessung des verkehrstelematischen Systems, um eine belastbare Datenbasis zu erhalten. Aufgrund dieser Daten können dann weitere Analysen erfolgen, die wieder weitere Messungen nach sich ziehen können. Die Messung darf sich dabei nicht nur auf die technischen Eigenschaften des Systems beschränken, sondern muss auch wirtschaftliche Größen berücksichtigen können.

Die Erarbeitung der dafür nötigen Theorie in Form der geeigneten Methodik, die Bereitstellung eines diese Methodik umsetzenden Rahmenwerks, sowie die Klarstellung der Anwendung der Methodik unter Zuhilfenahme des Rahmenwerks ist Zielsetzung der vorliegenden Arbeit.

Um den identifizierten Informationsmangel bezüglich der Leistungsfähigkeit von Verkehrstelematik im Allgemeinen und Verkehrsinformationssystemen unter Zuhilfenahme von Floating Car Data im Speziellen beheben zu können, ist der Begriff der Leistungsfähigkeit zu präzisieren. Des Weiteren ist zu klären, wie eine Messung dieser Leistungsfähigkeit in der geforderten technischen und wirtschaftlichen Dimension belastbar vorgenommen werden kann. Daraus wird eine theoretische Methodik der Messung in der Verkehrstelematik abgeleitet, die Gegenstand des vorliegenden Abschnitts ist. Im darauf folgenden Abschnitt 4 wird dargelegt, wie diese Methodik auf einen realen Anwendungsfall – Verkehrsinformation mit Floating Car Data – appliziert und umgesetzt werden kann.

3.1 Theorie der Messung

Als Leistungsfähigkeit sei im Folgenden die Fähigkeit eines Systems zur Erbringung einer zuvor definierten Leistung verstanden. Diese Fähigkeit wird damit zur gesuchten Messgröße, die durch Quantifizierung messbar gemacht werden soll. Es wird daher gezeigt, wie eine solche Quantifizierung im Bereich der Verkehrstelematik vorgenommen werden kann, um darauf

²⁶ Der Global Automotive Telematics Standard ist zwar ein Standard, der einen Rahmen u.a. für Floating Car Data Systeme definiert, ist jedoch sehr allgemeiner Natur und in der Anwendung nicht sehr weit verbreitet.

aufbauend zu einem Messprozess zu gelangen, der die Messung der Leistungsfähigkeit ermöglicht.

Nach den Definitionen von Abschnitt 2.1 bedeutet Verkehrstelematik den Einsatz von Telematik im Verkehrswesen, Telematik selbst wiederum setzt sich aus den Teilbereichen Telekommunikation und Informatik zusammen. Daher sollte eine geeignete Theorie der Messung beide Teilbereiche berücksichtigen. Die Grenze zwischen den Bereichen ist dabei keineswegs trennscharf, vielmehr greifen beide Bereiche ineinander, um ein Gesamtsystem zu bilden.

Da **Informatik** die „...*Wissenschaft von der systematischen Verarbeitung von Informationen...*“ [BIB06] darstellt, sind sämtliche Datenverarbeitungsschritte diesem Bereich zuzuordnen. Zur Quantifizierung dieser Datenverarbeitung als Teil einer Software bietet die Software-Technik folgende Definition einer **Metrik** an:

„Eine Software-Metrik definiert, wie eine Kenngröße eines Software-Produkts oder eines Software-Prozesses gemessen wird“. Metriken „...werden ermittelt, um ... quantitative Angaben über ... das Software-Produkt zur Verfügung zu stellen“²⁷.

Für Metriken können folgende Gütekriterien angegeben werden²⁸:

- **Objektivität:** keine subjektiven Einflüsse des Messenden möglich
- **Zuverlässigkeit:** gleiche Messergebnisse bei Wiederholung der Messung unter denselben Messbedingungen
- **Validität:** Messergebnisse erlauben einen eindeutigen Rückschluss auf die Ausprägung der Kenngröße
- **Normierung:** es existiert eine Skala, auf der die Messergebnisse eindeutig abgebildet werden
- **Vergleichbarkeit:** Messergebnisse können untereinander in Relation gesetzt werden

Des Weiteren können Metriken in **explizit** und **abgeleitet** unterteilt werden. Explizite Metriken können direkt ermittelt werden, während abgeleitete Metriken von expliziten oder anderen abgeleiteten Metriken berechnet werden²⁹. Als letzte Unterscheidung, die in den Bereich der Normierung zu zählen ist, seien **absolute** und **relative** Metriken genannt. Eine absolute Metrik erfasst den Wert direkt, eine relative Metrik wird in Bezug zu einer Vergleichsgröße ermittelt und meist in Prozent angegeben.

Dem Bereich der **Telekommunikation**, die als „*elektronische Übertragung und Austausch aller Arten von Information über größere Entfernungen*“ [BIB06] definiert ist, können hingegen sämtliche übertragungsrelevanten Prozessschritte eines verkehrstelematischen Systems zugeordnet werden. Für eine Quantifizierung würde prinzipiell die Informationstheorie von Shannon [SCA48] zur Verfügung stehen, die sich „*mit der strukturellen und quantitativen Erfassung und mit den Gesetzmäßigkeiten der Übermittlung und Verarbeitung von Nachrichten und den in ihnen enthaltenen Informationen befasst*“ [BIB06]. Sie ermöglicht es, der Zeichenfolge einer Nachricht einen Informationsgehalt zuzuordnen. Dieser Informationsgehalt wird als spezielles Maß definiert, das von den Wahrscheinlichkeiten, mit denen die einzelnen Zeichen der Nachricht auftreten,

²⁷ [BAL98], S.225

²⁸ [BAL98], S.227

²⁹ [BAL98], S.229

abhängt. Häufiger auftretende und damit wahrscheinlichere Zeichen haben damit einen geringeren Informationsgehalt als seltener auftretende [BIB06]. Der Informationsgehalt wird also vollkommen losgelöst von seinem Gesamtkontext mit statistischen Methoden ermittelt. Alleine schon aus der Definition des Begriffs Verkehrstelematik ist jedoch die integrative Betrachtung der Teilbereiche Telekommunikation und Informatik notwendig und somit durch das Maß Informationsgehalt unzureichend beschrieben.

In der Informationstheorie wird jedoch auch die **shannonsche Informationskette** als Grundmodell jeder Informationsübertragung definiert [BIB06], das in Abbildung 13 dargestellt ist.

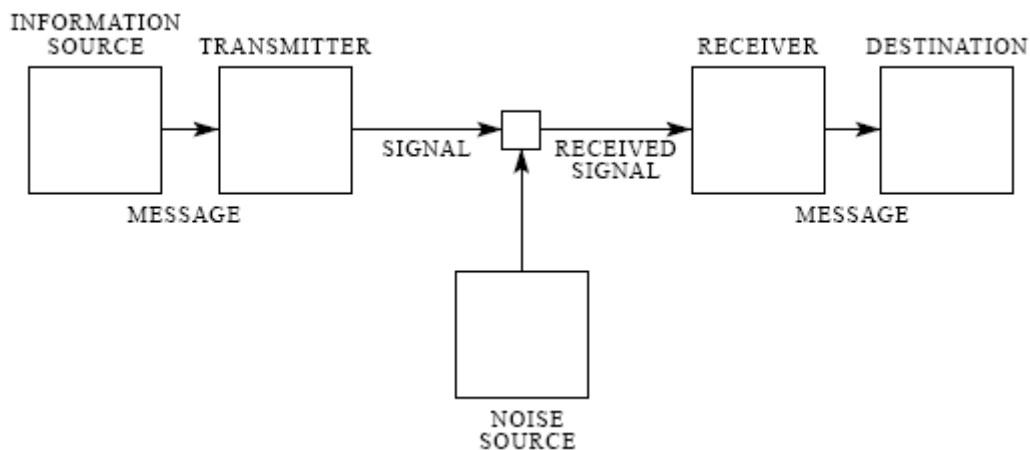


Abbildung 13: Shannonsche Informationskette [SCA48]

Da diese Informationskette eine allgemeine Form der Informationsübertragung repräsentiert, gilt sie auch für die Kommunikation innerhalb verkehrstelematischer Systeme. Die *Informationsquelle* (*information source*) kann dabei als das Fahrzeug interpretiert werden, die *Informationssenke* (*destination*) als der Empfänger. In dieser Sichtweise kann die in Abbildung 13 dargestellte Informationskette als up-link und down-link eines verkehrstelematischen Datenverarbeitungsprozesses gesehen werden, der festlegt, wie im verkehrstelematischen Sinn die Verschmelzung der Teilbereiche Telekommunikation und Informatik beschaffen ist: die *Informationsquelle* und *Informationssenke* stellen dabei die fahrzeugseitige und empfängerseitige Datenverarbeitung dar und sind daher dem Teilbereich Informatik zuzuordnen, die Anteile der Telekommunikation sind durch den *Sender* (*transmitter*), den *Übertragungskanal* und den *Empfänger* (*receiver*) gegeben, wobei der Übertragungskanal durch das *Rauschen* (*noise source*) gestört sein kann. Zur Quantifizierung der *Informationsquelle* und *-senke* wurde bereits mit dem Begriff der Metrik ein allgemein gehaltenes Maß mit zu erfüllenden Gütekriterien gefunden, mangels eines ähnlichen Maßes für die verbleibenden Teile der Informationskette wird daher für die Quantifizierung des *Senders*, *Übertragungskanals* und *Empfängers* ebenso der Begriff der Metrik übernommen. Das *Rauschen* wird als Einflussgröße auf den *Übertragungskanal* festgelegt und somit durch die Metriken für den *Übertragungskanal* erfasst.

Diese Informationskette kann nun verwendet werden, um den in Abschnitt 2.2.2 in Abbildung 2 vorgestellten gemeinsamen Datenverarbeitungsprozess von FCD-Verfahren zu dem in Abbildung 14 dargestellten **Datenverarbeitungsprozess für verkehrstelematische Systeme** zu verallgemeinern. Wird im Folgenden von einem verkehrstelematischen System gesprochen, so ist

damit ein System gemeint, das diesen Datenverarbeitungsprozess vollständig oder in Teilen umsetzt.

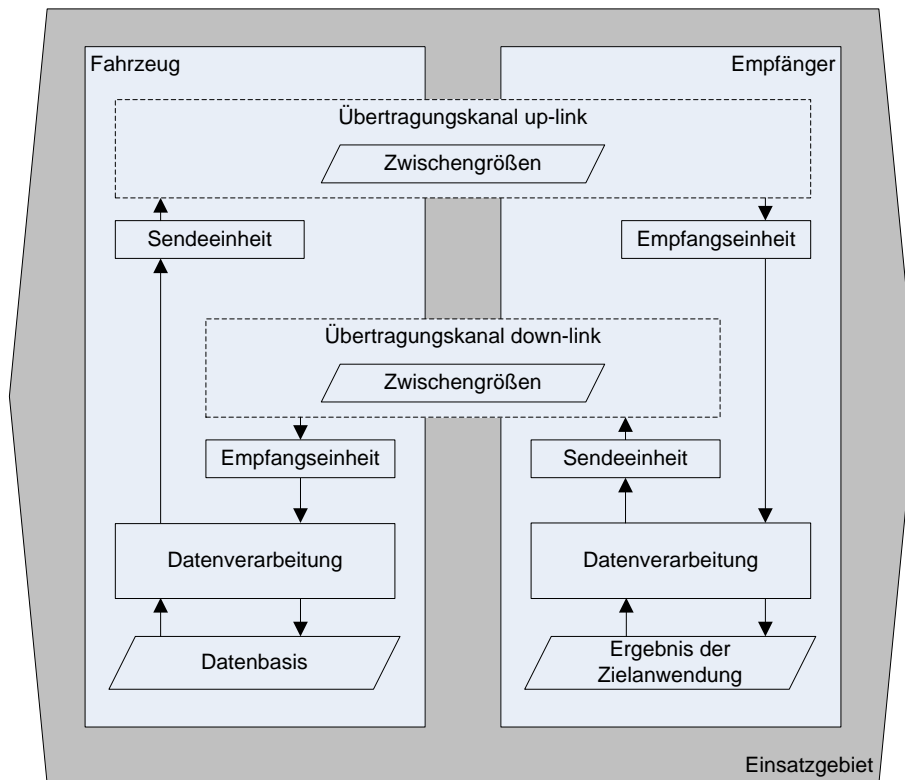


Abbildung 14: Datenverarbeitungsprozess von verkehrstelematischen Systemen³⁰

Als Ergebnis dieser Verallgemeinerung entstehen zwei Informationsketten, eine im up-link von einem Fahrzeug zu einem oder mehreren Empfängern und eine im down-link von einem Empfänger zu einem oder mehreren Fahrzeugen. Empfänger können andere Fahrzeuge, Zentralen oder infrastrukturell vorgehaltene Einrichtungen sein. Dabei ist in Abbildung 14 zu beachten, dass die Fahrzeuge und die Empfänger voneinander entkoppelt und asynchron agieren, die Interaktionen zwischen Fahrzeugen und Empfängern über die Übertragungskanäle sind also keiner festgelegten Reihenfolge unterworfen. Ebenso ist eine Verbindung zwischen Fahrzeugen und Empfängern über einen Übertragungskanal nicht zwingend als statisch anzusehen, sie kann auch dynamisch auf- und wieder abgebaut werden wie es etwa bei Ad-hoc-Netzen der Fall ist.

Die Informationskette im up-link beginnt im *Fahrzeug*. Die fahrzeugseitige *Datenverarbeitung* setzt auf der im Fahrzeug verfügbaren *Datenbasis* auf und verarbeitet diese. Wird dabei die Entscheidung getroffen, Informationen zu versenden, werden diese an die *Sendeeinheit* übergeben, der in der Lage ist, diese auf dem *Übertragungskanal up-link* zu versenden. In den übertragenen Informationen sind dabei die *Zwischengrößen* enthalten, die für das *Ergebnis der Zielanwendung* benötigt werden. Auf der Seite des *Empfängers* nimmt die *Empfangseinheit* die *Zwischengrößen* entgegen und stellt sie der empfängerseitigen *Datenverarbeitung* zur Verfügung. Diese verarbeitet die Informationen zum *Ergebnis der Zielanwendung*.

³⁰ Aktive Komponenten werden durch Rechtecke dargestellt, Daten durch Parallelogramme, das umgebende Sechseck hingegen illustriert nur die Rahmenbedingung Einsatzgebiet (urban, Autobahn, o.ä.).

Im down-link beginnt die Informationskette in einem *Empfänger*, der seine Informationen an Fahrzeuge verteilen will. Dazu wird das *Ergebnis der Zielanwendung* als empfängerseitige Datenbasis betrachtet und ähnlich der Informationskette im up-link über die Stationen empfängerseitige *Datenverarbeitung*, *Sendeeinheit*, *Übertragungskanal down-link*, *Empfangseinheit* und fahrzeugseitige *Datenverarbeitung* in die fahrzeugseitige *Datenbasis* eingepflegt. Wie zuvor erwähnt arbeiten beide Informationsketten voneinander unabhängig und können nach Bedarf auf- und wieder abgebaut werden.

Betrachtet man also ein verkehrstelematisches System nach Abbildung 14 und die gemachten Aussagen zum Begriff der Metrik, kann festgehalten werden, dass die Quantifizierung im Bereich der Verkehrstelematik durch das Auffinden einer geeigneten Menge von Metriken bewerkstelligt werden kann. Dies ist ein theoretisches Konstrukt, das noch keine Ableitung von konkreten Werten für die Quantifizierung beinhaltet. Das ist Aufgabe eines noch zu definierenden **Messprozesses**. In [BAL98]³¹ wurde ein solcher Prozess für den Bereich der Software-Technik definiert:

1. Definition der Messziele
2. Ableitung der Messaufgaben aus den Messzielen
3. Bestimmung der Messobjekte
4. Festlegen der Messgröße und der Messeinheit
5. Zuordnung der Messmethoden und Messwerkzeuge zu den Messobjekten und Messgrößen
6. Ermittlung der Messwerte
7. Interpretation der Messwerte

Dieser Prozess ist allgemein definiert und lässt keinen expliziten Bezug zur Software-Technik erkennen, daher wird er als Basis übernommen, im Folgenden für den Bereich der Verkehrstelematik präzisiert und mit den bereits eingeführten Begriffen abgestimmt.

Da eine Metrik definiert, wie eine Größe quantitativ gemessen werden kann, sind darin sowohl die Messaufgaben, die Messgröße und ihre Einheit enthalten. Das Messziel reduziert sich damit auf die Erhebung der jeweiligen Metrik. Folglich können die Punkte 1, 2 und 4 des Messprozesses zu „Definition der Metriken“ zusammengefasst werden. Für die Bestimmung der Messobjekte wurde in Abbildung 14 definiert, welche Komponenten für verkehrstelematische Systeme zur Verfügung stehen. Jede dieser Komponenten oder Teile davon kommen als Messobjekt in Frage. Im Messprozess wird Punkt 3 daher zu „Auswahl der Komponenten des verkehrstelematischen Systems“ konkretisiert.

Wesentliche Voraussetzung für Punkt 5 – die Zuordnung der Messmethoden und Messwerkzeuge zu den Messobjekten – ist das Vorhandensein sowohl der Messmethoden und Messwerkzeuge als auch der Messobjekte selbst. Das bedeutet, es muss ähnlich einem Prüfstand möglich sein, Messobjekte als Prüflinge in den Prüfstand „einzuspannen“, um an ihnen Messungen, die durch die Metriken definiert sind, durchführen zu können. Ein solcher Prüfstand wird in Abschnitt 3.2 detailliert vorgestellt werden, für den Messprozess verbleibt damit, Punkt 5

³¹ [BAL98], S.226

für den Bereich der Verkehrstelematik auf „Konfiguration des verkehrstelematischen Prüfstands“ zu präzisieren.

Punkt 6 und 7 bedürfen keiner Konkretisierung, sie werden jedoch aus Konsistenzgründen auf „Wertermittlung der Metriken im Prüfstand“ und „Interpretation der Ergebnisse“ umbenannt, sodass sich folgender **Messprozess für verkehrstelematische Systeme** ergibt:

1. **Definition der Metriken**
2. **Auswahl der Komponenten des verkehrstelematischen Systems**
3. **Konfiguration des verkehrstelematischen Prüfstands**
4. **Wertermittlung der Metriken im Prüfstand**
5. **Interpretation der Ergebnisse**

Der Messprozess bildet damit den theoretischen Rahmen zur Erhebung der in den Metriken definierten Kenngrößen. Der Prüfstand hingegen stellt das Instrumentarium dar, das die Theorie umsetzt und zu konkreten Ergebnissen führt.

3.2 Verkehrstelematischer Prüfstand

Im Allgemeinen ist es die Aufgabe eines Prüfstands, Prüflinge aufzunehmen, um an ihnen Messungen durchführen zu können. Für verkehrstelematische Systeme bedeutet dies, dass der Prüfstand in der Lage sein muss, das gesamte verkehrstelematische System, mindestens jedoch die relevanten Komponenten in sich aufzunehmen und sie derart zugänglich zu machen, dass alle über die Metriken definierten Kenngrößen abgegriffen werden können. Die Messung sollte dabei im laufenden Betrieb stattfinden, um realitätsnahe Werte für die Metriken zu erhalten. Zusätzlich sollten diese Werte für eine spätere Analyse aufgezeichnet werden können.

Daraus ergeben sich vier Anforderungen an den verkehrstelematischen Prüfstand:

- Aufnahme der Komponenten des verkehrstelematischen Systems
- Betrieb dieses Systems
- Zugriff auf relevante Kenngrößen in den Komponenten
- Aufzeichnung der Werte der Metriken

Betrachtet man diese Anforderungen, so ermöglicht es ein sie umsetzender Prüfstand, nicht nur bereits bestehende, sondern auch neuartige verkehrstelematische Systeme zu betreiben und anhand von Metriken zu messen.

Da ein verkehrstelematisches System nach Abbildung 14 aus einer Menge von Fahrzeugen, Übertragungskanälen und Empfängern besteht, erscheint es äußerst unwahrscheinlich, einen Prüfstand entwickeln zu können, der all diese Komponenten als physisch real vorhandene Objekte aufnehmen kann. Abhilfe schafft hier die Simulation, *„...die Nachbildung von Vorgängen mithilfe eines Computers. Sie wird zur Untersuchung von Abläufen eingesetzt, die man in der Wirklichkeit aus Zeit-, Kosten-, Gefahren- oder anderen Gründen nicht durchführen kann oder will“* [BIB06].

Ein vergleichbarer Ansatz ist aus der Straßenverkehrstechnik unter dem Begriff **„mikroskopische Simulation“** bekannt und wird *„...für die Behandlung verkehrsplanerischer*

Fragestellungen...[wie etwa]...die Abbildung und die Prognose von Auswirkungen klassischer und neuartiger Maßnahmen der Nachfragebeeinflussung in städtischen Verkehrsnetzen³² eingesetzt. Die mikroskopische Simulation „geht [dabei] von einer statistischen Simulation von Einzelereignissen (Ortsveränderungen von statistischen Personen oder Fahrzeugen) aus“³³. Darin wird menschliches Fahrverhalten angenähert und ermöglicht so die realitätsnahe Untersuchung von Verkehrsströmen mit den sich darin bewegenden Fahrzeugen.

Diese Analogie ist in zweifacher Hinsicht interessant: zum einen stützt das Vorhandensein und die Verwendung von mikroskopischer Simulation zur Untersuchung komplexer verkehrsplanerischer Phänomene den Ansatz des Prüfstands, ebenfalls Simulation zur Untersuchung komplexer verkehrstelematischer Systeme einzusetzen. Zum anderen wird aber durch die Verwendung von Simulation die Problematik aufgeworfen, wie die Fahrzeuge eines verkehrstelematischen Systems dann realitätsnah gesteuert werden könnten – eine Problematik, für die die mikroskopische Simulation bereits eine Lösung zur Verfügung stellt.

Ein weiteres Argument, das für die Verwendung von Simulation als Unterstützung des verkehrstelematischen Prüfstands spricht, leitet sich aus den Betrachtungen über die Ausstattungsrate des Abschnitts 2.2.2 ab. Die Anforderung, ein verkehrstelematisches System im Prüfstand im laufenden Betrieb für Messungen zur Verfügung zu stellen, bedingt das Vorhandensein einer vorgegebenen Ausstattungsrate von partizipierenden Fahrzeugen am Gesamtkollektiv der Fahrzeuge im Untersuchungszeitraum und -gebiet. Die Größenordnung dieser Ausstattungsrate wird in Feldversuchen vor allem durch ökonomische Gesichtspunkte bestimmt und fällt wie in Abschnitt 2.2.3 in den Bemerkungen zu den durchgeführten Feldversuchen in der Regel sehr gering aus. Die Verwendung von Simulation eröffnet hier völlig neue Möglichkeiten, unterliegt man hier doch keinen realen ökonomischen Grenzen, sondern zeichnet die dabei entstehenden monetären Größen durch Definition geeigneter Metriken innerhalb des Prüfstands auf – eine Anforderung, die ohnehin für den Prüfstand schon gestellt wurde.

Diese Möglichkeit, Untersuchungen bei beliebigen Ausstattungsraten vornehmen zu können, bricht auch die „Henne-Ei-Problematik“ der verkehrstelematischen Systeme auf: da die Qualität dieser Systeme unter anderem direkt von der Ausstattungsrate abhängt, ist bei Markteinführung durch die zu erwartenden niedrige Ausstattungsrate eine geringere als die potentiell mögliche Qualität zu erwarten. Für einen Erfolg des Systems ist aber eine gewisse Mindestqualität erforderlich, um sich am Markt behaupten zu können. Liegt die für die Mindestqualität erforderliche Ausstattungsrate in einem Bereich, der durch klassische Feldversuche nicht mehr abgedeckt werden kann, so liegen für diesen kritischen Wert keinerlei belastbare Daten vor. Es entsteht wiederum der in Abschnitt 3 identifizierte Informationsmangel, der durch die Verwendung von Simulation behoben werden kann.

Aus diesem und den zuvor genannten Gründen erscheint es vorteilhaft, für Untersuchungen an verkehrstelematischen Systemen – in Analogie zur Verwendung von mikroskopischer Simulation bei verkehrsplanerischen Fragenstellungen – einen „**Verkehrstelematiksimulator**“ zu entwickeln, der eine virtuelle Realität für die Messung zur Verfügung stellen kann.

³² [SCB97], S.263

³³ [SCB97], S.221

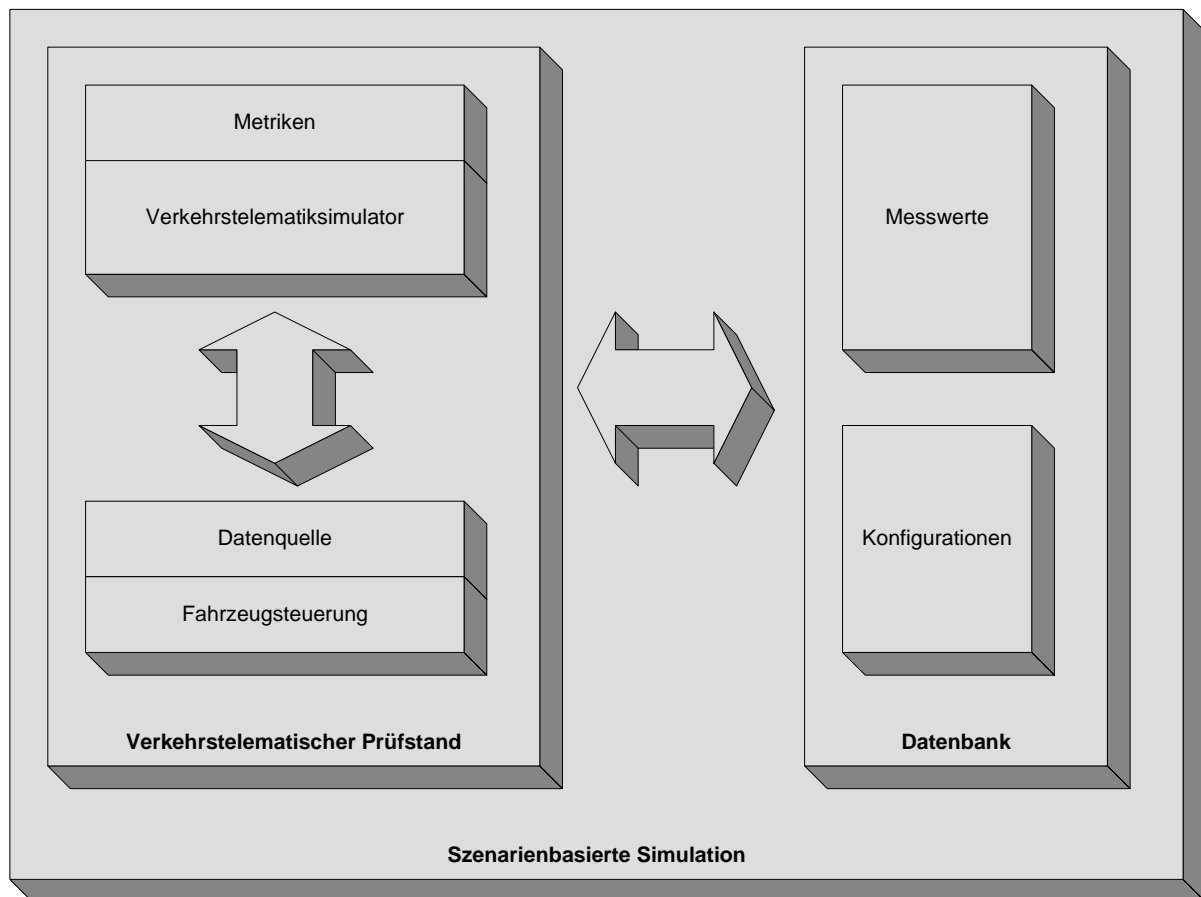


Abbildung 15: Aufbau und Einbettung des verkehrstelematischen Prüfstands

Diese virtuelle Realität stellt eine Abbildung eines verkehrstelematischen Systems in Software dar und kann durch mehrere Methoden erfolgen. Eine anerkannte Methode ist die objektorientierte Methode, bei der eine Komponente durch ihr Verhalten und ihre Eigenschaften eindeutig beschrieben wird [BAL98]. Damit kann jede in Abbildung 14 dargestellte Komponente mit ihrem Verhalten und ihren jeweiligen Eigenschaften in den Verkehrstelematiksimulator integriert werden. Danach steht jede verfahrensrelevante Komponente als Software zur Verfügung, was bedeutet, dass alle ihre Daten zugänglich sind und somit alle darauf aufbauenden Kenngrößen für die Metriken abgegriffen werden können. Dadurch sind die Anforderungen „Aufnahme der Komponenten des verkehrstelematischen Systems“ und „Zugriff auf relevante Kenngrößen in den Komponenten“ erfüllt.

Für den Betrieb eines solchen Systems muss der Verkehrstelematiksimulator fortlaufend von einer Datenquelle mit Daten versorgt werden, die von einer realitätsnahen Fahrzeugsteuerung gespeist wird. Der Verkehrstelematiksimulator baut auf dieser Datenquelle auf, somit ist es aus seiner Sicht irrelevant, von welcher Fahrzeugsteuerung die Datenquelle ihre Daten bezieht. Dies ermöglicht sowohl die Verwendung von mikroskopischer Simulation als Fahrzeugsteuerung als auch den Einsatz realer Fahrzeuge in einem Feldversuch, letztere jedoch mit den bereits erwähnten ökonomischen Restriktionen.

Des Weiteren benötigt der Verkehrstelematiksimulator eine Konfiguration mit Eingangsparametern, wie etwa die zu verwendende Ausstattungsrate. Hinterlegt man diese für den Betrieb des verkehrstelematischen Systems interessierenden Konfigurationen in einer

Datenbank, kann damit zusammen mit dem Vorhandensein der Datenquelle auch die Anforderung „Betrieb dieses Systems“ erfüllt werden. Da die hinterlegten Konfigurationen jeweils unterschiedlichen zu untersuchenden Szenarien entsprechen, kann von einer szenarienbasierten Simulation gesprochen werden. Die Datenbankverbindung ermöglicht darüber hinaus das Erfüllen der letzten Anforderung „Aufzeichnung der Werte der Metriken“, indem die von den Metriken ermittelten Messwerte in der Datenbank gespeichert werden.

Der beschriebene Aufbau des verkehrstelematischen Prüfstands ist in Abbildung 15 veranschaulicht und wird in den nachfolgenden Abschnitten vertieft.

3.2.1 Datenquelle

Für den Betrieb des verkehrstelematischen Systems benötigt der Verkehrstelematiksimulator kontinuierlich aktuelle Daten. Der in Abbildung 14 dargestellte Prozess geht dabei von Fahrzeugen als primäre Datenquellen aus. Diese Fahrzeuge bewegen sich innerhalb eines Verkehrsnetzes. Daraus kann abgeleitet werden, dass für den Verkehrstelematiksimulator sowohl Daten der Fahrzeuge als auch über das zugrunde liegende Verkehrsnetz vorliegen müssen.

Sowohl die Fahrzeugdaten als auch die Verkehrsnetzdaten können weiter in statische und dynamische unterteilt werden. Damit ergeben sich für die Datenquelle folgende vier Gruppen von Daten, in Klammer sind jeweils Beispiele angeführt:

- Dynamische Fahrzeugdaten (Geschwindigkeit, Position, etc.)
- Statische Fahrzeugdaten (Fahrzeuglänge, Höchstgeschwindigkeit auf einem Segment eines bestimmten Straßentyps, etc.)
- Dynamische Verkehrsnetzdaten (Verkehrsnachfragebeziehungen, Programme von Lichtsignalanlagen, etc.)
- Statische Verkehrsnetzdaten (Segmentlänge, Anzahl der Fahrspuren eines Segments, etc.)

Welche Daten der einzelnen Gruppen dabei für den Verkehrstelematiksimulator zur Verfügung stehen müssen, hängt von der umzusetzenden Zielanwendung ab. Prinzipiell können damit beliebige Datenquellen verwendet werden, die in der Lage sind, sowohl die benötigten Daten bereitzustellen, als diese auch in ausreichender Menge (Ausstattungsrate) und Frequenz zu liefern. Das können Daten aus Feldversuchen oder Daten aus mikroskopischer Simulation sein. Sind dabei Ausstattungsraten erforderlich, die im Rahmen von Feldversuchen nicht erzielt werden können, so bleibt als Option nur die Simulation.

Umgekehrt betrachtet sind die im Verkehrstelematiksimulator umsetzbaren Zielanwendungen von den verfügbaren Daten der Datenquelle abhängig. Dies ist eine Einschränkung, die Feldversuchen und simulationsunterstützten Untersuchungen gemein ist: die in realen Fahrzeugen umsetzbaren Zielanwendungen werden ebenso durch die fahrzeugeitig vorhandenen Daten, die von Datenbussen oder Fahrerassistenzsystemen stammen können, bestimmt.

3.2.2 Fahrzeugsteuerung

Der Datenquelle zugrunde liegend ist – wie in Abbildung 15 dargestellt – die Fahrzeugsteuerung, ihr entstammen primär die dynamischen Fahrzeugdaten. Diese ergeben sich aus der Bewegung

von realen oder simulierten Fahrern in einem Verkehrsnetz unter Berücksichtigung der verkehrlichen Randbedingungen wie Lichtsignalanlagen, Geschwindigkeitsbegrenzungen oder auch der aktuellen Verkehrsnachfrage. Im Fall realer Fahrzeuge entfällt die Fahrzeugsteuerung für den verkehrstelematischen Prüfstand, sie wird von den Fahrern der Fahrzeuge übernommen. Wird mikroskopische Simulation verwendet, ist es Aufgabe der Simulation, die Fahrzeuge in realitätsnaher Art und Weise zu steuern. Die Datenquelle für den Teil der dynamischen Fahrzeugdaten ergibt sich in beiden Fällen aus einer Aufzeichnung der Daten einzelner Fahrzeuge und anschließendem Zusammenführen dieser Daten in der Datenquelle.

Um dynamische Fahrzeugdaten liefern zu können, muss die Fahrzeugsteuerung wie eingangs erwähnt das (statische) Verkehrsnetz kennen, in dem sich die Fahrzeuge bewegen, aber auch die dynamischen verkehrnetzrelevanten Randbedingungen. Daher kann die Fahrzeugsteuerung die statischen und dynamischen Verkehrsnetzdaten für die Datenquelle bereitstellen. Als letzte Datengruppe sind die statischen Fahrzeugdaten zu nennen. Da diese Daten im Falle von Simulation in der mikroskopischen Simulation bekannt sind, können sie ebenso von der Fahrzeugsteuerung für die Datenquelle bereitgestellt werden. Im Falle realer Feldversuche müssen diese Daten manuell erhoben werden und in dieser Form für die Datenquelle aufbereitet werden.

Die Fahrzeugsteuerung erfüllt auch noch einen anderen Zweck. In dem in Abbildung 14 dargestellten Prozess für verkehrstelematische Systeme ist es auch möglich, das Ergebnis der Zielanwendung wieder an die Fahrzeuge rückzukoppeln, um dort das Fahrverhalten zu beeinflussen. Ein Beispiel wäre ein Verkehrsinformationssystem, dessen Ergebnis der Zielanwendung die Rekonstruktion der Verkehrslage ist. Eine daraus gewonnene Verkehrsinformation, die wieder an die Verkehrsteilnehmer verteilt wird, soll ein Umfahren von gestauten Bereichen ermöglichen und so in die Fahrzeugsteuerung eingreifen. In realen Fahrzeugen übernimmt dies wieder der Fahrer – eventuell unter Zuhilfenahme eines Navigationsgerätes mit dynamischer Navigation –, im Fall von Simulation muss hierfür eine Möglichkeit zur Verfügung stehen, auf das simulierte Fahr- und Routenwahlverhalten der simulierten Fahrzeuge einzuwirken. Ob derartige Untersuchungen im letztgenannten Fall durchgeführt werden können, hängt von der verwendeten mikroskopischen Simulationssoftware ab.

3.2.3 Verkehrstelematiksimulator

Nach den eingangs definierten Anforderungen soll ein verkehrstelematischer Prüfstand ein verkehrstelematisches System aufnehmen können, dieses basierend auf den Daten der Datenquelle betreiben können, die integrierten Komponenten einer Messung zugänglich machen und die entstehenden Kenngrößen aufzeichnen können. Der Verkehrstelematiksimulator ist dabei für die Aufnahme aller Komponenten des verkehrstelematischen Systems zuständig. Der verkehrstelematische Prüfstand hingegen ist für alle messrelevanten Komponenten und Aufgaben zuständig. Da der Verkehrstelematiksimulator alle Komponenten des verkehrstelematischen Systems beinhaltet, ist er auch für die Bereitstellung der benötigten Daten für den verkehrstelematischen Prüfstand zuständig, die Ansteuerung sowohl für den Betrieb des verkehrstelematischen Systems im Verkehrstelematiksimulator, als auch für das Abgreifen der Messwerte liegt jedoch beim verkehrstelematischen Prüfstand.

3.2.3.1 Basiskomponenten und abgeleitete Komponenten

Im Verkehrstelematiksimulator wird das reale verkehrstelematische System unter Zuhilfenahme der objektorientierten Methode in Software abgebildet. Nach Abschnitt 3.1 ist ein verkehrstelematisches System dadurch gekennzeichnet, dass es den in Abbildung 14 vorgestellten Datenverarbeitungsprozess vollständig oder in Teilen umsetzt. Aus diesem Datenverarbeitungsprozess lassen sich daher diejenigen Komponenten ableiten, die für den Betrieb vorhanden sein müssen. Um nicht für jedes erdenkliche verkehrstelematische System den gesamten Abbildungsaufwand betreiben zu müssen, erscheint es vorteilhaft, ein Rahmenwerk zur Verfügung zu stellen, das für die benötigten Komponenten bereits eine Grundfunktionalität bereit hält, die das im Anwendungsfall betrachtete verkehrstelematische System dann weiterverwendet oder auch modifizieren kann.

Hierbei unterstützt die objektorientierte Methode mit dem Prinzip der **Vererbung** [BAL98]. Nach diesem Prinzip können Komponenten aus anderen Komponenten derart abgeleitet werden, dass sie sowohl gemeinsames Verhalten als auch Eigenschaften aufweisen, sich in ihren Einzelausprägungen jedoch unterscheiden können. Dabei vererbt – ähnlich der Vererbung beim Menschen – eine Basiskomponente ihr Verhalten und ihre Eigenschaften an eine davon abgeleitete Komponente. Diese kann diese Teile vollständig übernehmen, aber auch verändern oder kann sogar zusätzliches Verhalten und weitere Eigenschaften definieren, welche nichts mit der Basiskomponente gemein haben. Das Prinzip der Vererbung sieht dann vor, dass jede derart abgeleitete Komponente durch die Vererbungsbeziehung immer noch eine Komponente vom Typ der Basiskomponente darstellt und daher an jeder Stelle verwendet werden kann, an der eine Basiskomponente verwendet wird. Die Basiskomponente stellt damit eine Art Platzhalter für eine spätere Integration der jeweiligen Einzelausprägung in Form der abgeleiteten Komponente dar.

Verwendet man dieses Prinzip für die Ableitung der möglichen Komponenten aus Abbildung 14, so ist das Resultat eine Menge von Basiskomponenten, die ein Verhalten und Eigenschaften aufweisen, von denen zu erwarten ist, dass sie von allen oder zumindest den meisten verkehrstelematischen Systemen benötigt werden. Von diesen Basiskomponenten können dann je nach Anwendungsfall die für den Anwendungsfall relevanten Komponenten in ihren jeweiligen Ausprägungen abgeleitet werden, die dann im Verkehrstelematiksimulator betrieben werden.

Ein Beispiel für eine Basiskomponente wäre ein Fahrzeug. Allen Fahrzeugen gemein ist, dass sie sich fortbewegen können, das heißt, dass sie mit Daten der Datenquelle derart versorgt werden, dass in der Basiskomponente Fahrzeug wie in einem realen Fahrzeug kontinuierlich Fahrzeugdaten abgegriffen werden können. Wie das Fahrzeug jedoch anschließend mit diesen Daten weiter verfährt, hängt davon ab, welche Aufgabe das Fahrzeug in dem umzusetzenden verkehrstelematischen System des Anwendungsfalls zu erfüllen hat und unterscheidet sich von System zu System. So wären sowohl ein Fahrzeug, das seine Informationen nach dem zentralen Kommunikationsprinzip an eine Zentrale versendet, als auch ein Fahrzeug, das diese dezentral an andere Fahrzeuge verteilt, abgeleitet von der Basiskomponente Fahrzeug und übernehmen deren grundlegende Basis-Funktionalität der Fortbewegung und der Datenzugänglichkeit.

Der Vorteil dieser Herangehensweise ist zum einen die Konzentration auf die wesentlichen Verfahrensbestandteile, in denen sich das verwendete verkehrstelematische System von anderen Systeme unterscheidet als auch zum anderen die Vermeidung von redundantem Aufwand durch mehrfache Umsetzung von gemeinsamer Funktionalität. Sind die Basiskomponenten identifiziert,

so genügt eine Ableitung von diesen, um Komponenten zu schaffen, die die restlichen, speziellen Verhaltensbestandteile und Eigenschaften des verkehrstelematischen Systems des Anwendungsfalls integrieren.

Für die Ableitung der Basiskomponenten nach Abbildung 14 können mit zwei Ausnahmen alle dort dargestellten aktiven Komponenten übernommen werden. Die erste Ausnahme bildet die Komponente Empfänger: berücksichtigt man beide in Abschnitt 2.2.2.1 möglichen Kommunikationsvarianten (zentral und dezentral), so kann der Empfänger entweder ein Fahrzeug (dezentrale Kommunikation) oder eine Zentrale (zentrale Kommunikation) sein. Als Konsequenz daraus ist eine eigene Basiskomponente Empfänger überflüssig, da der Empfänger entweder durch ein Fahrzeug oder eine Zentrale gegeben ist. Die zweite Ausnahme stellt die Datenverarbeitung dar: sie ist sowohl für ein Fahrzeug als auch einen Empfänger möglich und erfüllt – ähnlich den Bemerkungen zum up- und down-link des Abschnitts 3.1 – jeweils grundlegend andere Aufgaben. Somit wird eine Unterscheidung in eine fahrzeugseitige und eine empfängerseitige Datenverarbeitung notwendig.

Zusammenfassend ergeben sich damit folgende Basiskomponenten:

- Fahrzeug
- Zentrale
- Fahrzeugseitige Datenverarbeitung
- Sendeeinheit
- Übertragungskanal
- Empfangseinheit
- Empfängerseitige Datenverarbeitung

3.2.3.2 Beziehungen zwischen den Basiskomponenten

Um Flexibilität für unterschiedliche Zielanwendungen zu gewährleisten, ist bei den Beziehungen der Basiskomponenten untereinander ein möglichst generischer Ansatz zu wählen. Ein Ansatz, der dieser Forderung Rechnung trägt, ist in Abbildung 16 dargestellt. Die verwendete Darstellungsform nennt sich Klassendiagramm und wird in der Softwaretechnik für die Darstellung und Modellierung von Beziehungen zwischen aktiven Komponenten³⁴ eingesetzt.

Die Beziehungen mit einem Rhombus an einer Seite können ausgehend von der Klasse, auf deren Seite der Rhombus dargestellt ist, mit „besteht aus“ gelesen werden, diejenigen ohne Rhombus als „kennt“.

Die Beziehungen können auch Kardinalitäten enthalten, die angeben, wie viele Beziehungen eine Komponente zu anderen Komponenten unterhält. Eine Kardinalität „a..b“ bedeutet, dass

³⁴ Die Unified Modeling Language (UML) ist eine von der Object Management Group (OMG) entwickelte und standardisierte Sprache für die Modellierung von Software und anderen Systemen [WIK06]. Das Klassendiagramm ist in der UML definiert und modelliert eigentlich Klassen, laut UML gibt es für Komponenten ein eigenes Diagramm, das Komponentendiagramm. Diese softwaretechnisch korrekte Unterscheidung ist für das Verständnis der vorliegenden Arbeit jedoch nicht erforderlich, sodass der im normalen Sprachgebrauch verwendete Begriff der Komponente ausreichend ist und deshalb verwendet wird.

minimal a und maximal b Beziehungen bestehen, b nimmt dabei oft den Wert „*“ an, der für „beliebig viele“ steht. Damit können auch Optionalitäten ausgedrückt werden, wie in Abbildung 16 mit „0..*“ angegeben, wohingegen eine Kardinalität von „1..*“ als „mindestens eine“ gelesen werden kann.

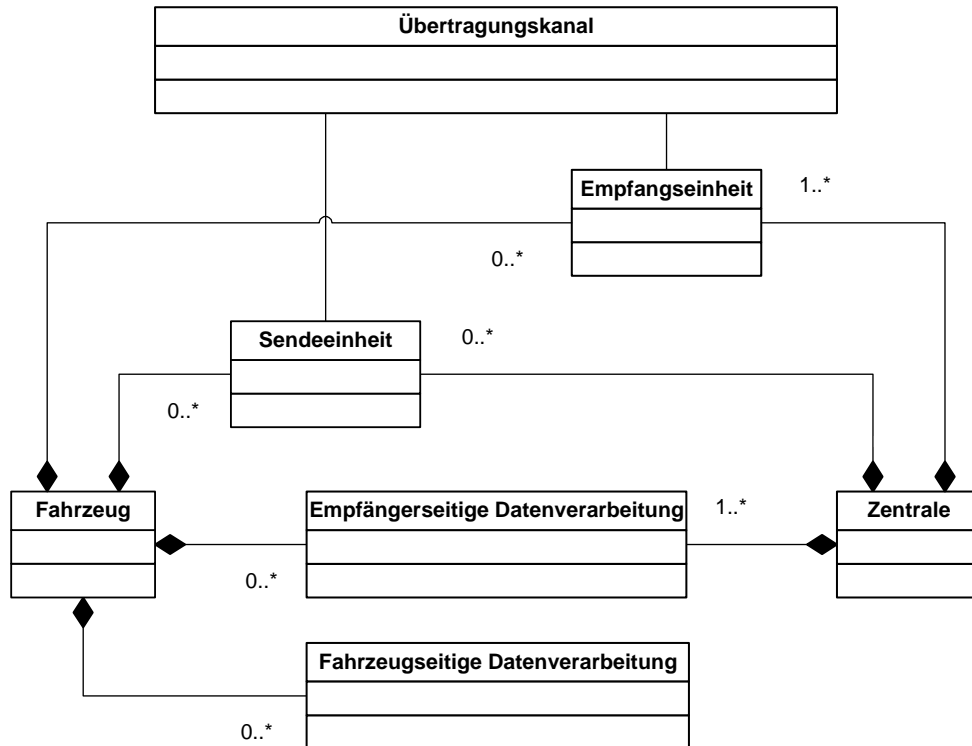


Abbildung 16: Basiskomponenten eines verkehrstelematisches Systems

Dieser Nomenklatur folgend kann die Basiskomponente *Fahrzeug* aus einer *fahrzeugseitigen Datenverarbeitung*, einer *Sendeeinheit*, einer *Empfangseinheit* und einer *empfängerseitigen Datenverarbeitung* bestehen. Alle diese Beziehungen sind optional, da es von der jeweiligen Zielanwendung abhängt, ob das Fahrzeug Daten verarbeitet, versendet und/oder empfängt.

Ist beispielsweise die Zielanwendung lediglich die Rekonstruktion der Verkehrslage in einem zentralen Kommunikationsszenario, so wird es für ein Fahrzeug ausreichen, über eine fahrzeugseitige Datenverarbeitung sowie eine Sendeeinheit zu verfügen, um der Zentrale die gewünschten Daten liefern zu können. Diese rekonstruiert nun die Verkehrslage unter Zuhilfenahme einer Empfangseinheit und einer empfängerseitigen Datenverarbeitung. In dieser Zielanwendung interessiert die Weiterverteilung der zentralseitig generierten Information an Fahrzeuge nicht weiter, sodass für die Zentrale die Sendeeinheit und für ein Fahrzeug die Empfangseinheit sowie die empfängerseitige Datenverarbeitung entfallen können.

In einem dezentralen Kommunikationsszenario bei gleicher Zielanwendung hingegen kommunizieren die Fahrzeuge untereinander und rekonstruieren auch ihre eigene Verkehrslage ohne Zuhilfenahme einer Zentrale. Hier wird das Fahrzeug sowohl aus einer fahrzeugseitigen Datenverarbeitung und einer Sendeeinheit als auch einer Empfangseinheit und einer empfängerseitigen Datenverarbeitung bestehen.

Dies sind nur zwei Beispiele, aus denen jedoch die Notwendigkeit der Optionalitäten ersichtlich wird. Da es im Allgemeinen für ein Fahrzeug auch möglich sein muss, Daten über mehr als einen Kommunikationskanal zu übertragen – wie viele genau hängt wieder von der Zielanwendung ab –, wird bei den Beziehungen als Obergrenze „beliebig“ angegeben. Es bleibt die Frage nach dem Sinn des Minimalfalls eines Fahrzeugs ohne jegliche Datenverarbeitung und Sende/Empfangseinheiten. Dies sind Fahrzeuge im Verkehrstelematiksimulator, die nicht an dem verkehrstelematischen System partizipieren, aufgrund ihres Vorhandenseins jedoch das Fahrverhalten der partizipierenden Fahrzeuge beeinflussen. Dieser Fall tritt immer dann auf, wenn die Ausstattungsrate Werte kleiner als einhundert Prozent annimmt.

Eine *Zentrale* ist durch andere Beziehungen gekennzeichnet. Um überhaupt eine Daseinsberechtigung zu haben, muss eine Zentrale Daten sammeln und auswerten können. Daher besteht sie aus mindestens einer *Empfangseinheit* und mindestens einer *empfängerseitigen Datenverarbeitung*³⁵. Optional kann eine Zentrale aus einer oder mehreren *Sendeeinheiten* bestehen. Wie viele Sende- und Empfangseinheiten, bzw. empfängerseitigen Datenverarbeitungs-komponenten verwendet werden, hängt wieder von der verwendeten Zielanwendung ab.

Der *Übertragungskanal* schließlich verbindet die zusammengehörigen *Sende-* und *Empfangseinheiten* und muss diese daher kennen, umgekehrt müssen die Sende- und Empfangseinheiten den Übertragungskanal kennen. Die Kardinalitäten sind dadurch eindeutig und wurden in Abbildung 16 aus Gründen der Übersichtlichkeit weggelassen: jeder Übertragungskanal muss mindestens eine und maximal beliebig viele Sende- und Empfangseinheiten kennen, eine Sende- oder Empfangseinheit hingegen kennt genau einen Übertragungskanal.

3.2.4 Metriken

Alle Komponenten im Verkehrstelematiksimulator müssen zum Zweck der Messbarkeit für die Messung – wie in den Metriken definiert – zugänglich sein. Welche Metriken verwendet werden, hängt von der umzusetzenden Zielanwendung ab. Allen gemein ist jedoch die Art und Weise, wie sie in den verkehrstelematischen Prüfstand integriert werden:

Für Metriken gibt es ähnlich der Komponenten im Verkehrstelematiksimulator eine eigene Basiskomponente *Kriterium*, die die allgemeine Funktionalität von Metriken umsetzt. Jede Metrik muss Zugang zu den Daten von Komponenten des Verkehrstelematiksimulators haben. Dies wird dadurch erreicht, dass die Komponenten des Verkehrstelematiksimulators definieren, welche Daten für Metriken potentiell zur Verfügung stehen. Da diese Komponenten diese Daten ohnehin für ihre interne Berechnung erzeugen, liegen die Daten bereits vor uns müssen nur an definierten Stellen für die Basiskomponente *Kriterium* bereitgestellt werden.

Eine Ausnahme bilden hier **kostenbezogene Metriken**: die für die technische Funktionalität benötigten Daten liegen bereits in den Komponenten des Verkehrstelematiksimulators vor.

³⁵ Bezüglich der empfängerseitigen Datenverarbeitung des in Abbildung 16 dargestellten Klassendiagramms sei angemerkt, dass zwar im Klassendiagramm sowohl von Fahrzeug als auch von Zentrale eine Beziehung zur empfängerseitigen Datenverarbeitung eingezeichnet ist, dies aber nicht bedeutet, dass Fahrzeug und Zentrale dieselbe empfängerseitige Datenverarbeitung besitzen. Es stellt lediglich dar, dass diese Beziehungen zwischen den genannten Basiskomponenten prinzipiell bestehen.

Kostenbezogene Metriken beziehen sich jedoch immer auf Kostenmengen, die, mit einem Stückpreis versehen, die tatsächlichen Kosten ergeben. Welche Daten kostenrelevant sind und in welchen kostenrelevanten Mengen anfallen, muss in den Komponenten des Verkehrstelematiksimulators explizit angegeben werden. Dies wird durch eine weitere Basiskomponente namens *Kostenmengenobjekt* erreicht, die Kostenmengen aufzeichnen kann. Jede Komponente, in der Kostenmengen anfallen, muss nur von der Basiskomponente *Kostenmengenobjekt* erben, um die Funktionalität zum Aufzeichnen von Kostenmengen bereitstellen zu können. In Abbildung 16 wurden die Basiskomponenten des Verkehrstelematiksimulators in ihrer Wechselwirkung vorgestellt. Alle darin genannten Komponenten sind kostenrelevante Komponenten. Da *Sendeeinheit*, *Empfangseinheit* und *Datenverarbeitung* jedoch jeweils *Fahrzeug* und *Zentrale* zugeordnet sind, genügt es für diese Komponenten, die Basiskomponenten *Fahrzeug* und *Zentrale* für die Aufzeichnung der Kostenmengen zu berücksichtigen. Sie zeichnen dann alle Kosten inklusive der ihnen zugeordneten Komponenten auf. Es verbleibt noch der *Übertragungskanal*, der diese Funktionalität ebenso bereitstellen muss. Damit genügt es, die Basiskomponenten *Fahrzeug*, *Zentrale* und *Übertragungskanal* von der Basiskomponente *Kostenmengenobjekt* zu vererben, um allen Komponenten des Verkehrstelematiksimulators die Funktionalität zur Kostenmengenaufzeichnung bereitzustellen. Mit Hilfe dieses weiteren Vererbungsstrukts stehen nun der eingangs erwähnten Basiskomponente *Kriterium* – vergleichbar zu den Daten für die technische Funktionalität – auch Kostenmengen als weitere Daten zur Verfügung³⁶.

In zeitlicher Hinsicht kann der Zugriff auf die Daten der Komponenten des Verkehrstelematiksimulators auf zwei Arten erfolgen: kontinuierlich während oder am Ende eines Messdurchlaufs³⁷. Welche zeitliche Frequenz und welche Daten verwendet werden, hängt von der jeweiligen Metrik ab, die die Weiterverarbeitung zu Kenngrößen sowohl definiert als auch in der entsprechend von der Basiskomponente *Kriterium* abgeleiteten Komponente umsetzt. Die Ansteuerung, Aktualisierung bei kontinuierlichem Zugriff, Wertberechnung am Ende des Messdurchlaufs einer Menge von beliebigen Metriken, sowie die Bereitstellung dieser Messergebnisse für den Transfer in die Datenbank übernimmt dabei die Basiskomponente *Profil*. Sie besteht aus einer Menge von Basiskomponenten *Kriterium*, die jeweils von ihr für das Abgreifen der Werte von den Komponenten des Verkehrstelematiksimulators, sowie das Erzeugen der Messwerte angesteuert werden. Damit können für verschiedene Untersuchungen unterschiedliche Mengen von Metriken durch Ableitung einer entsprechenden Komponente von der Basiskomponente *Profil* zusammengestellt werden.

3.2.5 Kalibrierung im Rahmen der Konfiguration

Um den verkehrstelematischen Prüfstand möglichst nahe der Realität anzupassen, gibt es zwei Ebenen, die Kalibrierungsmöglichkeiten vorsehen: die Fahrzeugsteuerung und den Verkehrstelematiksimulator. Unter Kalibrierung wird dabei die Korrektur von realitätsabweichendem Verhalten des verkehrstelematischen Prüfstands durch Parametrierung verstanden. Sie beschreibt also notwendige Anpassungen, ohne die der verkehrstelematische Prüfstand keine oder nur bedingt realitätsnahe Ergebnisse erzeugen würde. Die Kalibrierung wird

³⁶ Für die Ermittlung der tatsächlichen Kosten durch Zuordnung von Stückpreisen zu den ermittelten Kostenmengen sei auf Abschnitt 3.6.1.2 verwiesen.

³⁷ Weitere Details zum zeitlichen Ablauf des Messvorgangs finden sich im Abschnitt 3.3.3.

dem verkehrstelematischen Prüfstand als Teil der in der Datenbank hinterlegten Konfigurationen bereitgestellt.

3.2.5.1 Kalibrierung der Fahrzeugsteuerung und der Datenquelle

Wird die Fahrzeugsteuerung von realen Fahrzeugen übernommen, entfällt naturgemäß für diese Ebene die Kalibrierung. Wird hingegen mikroskopische Simulation zur Gewinnung der Datenquelle aus der Fahrzeugsteuerung verwendet, so müssen die verwendeten Parameter, insbesondere die statischen und dynamischen Verkehrsnetzdaten sowie die die dynamischen Fahrzeugdaten beeinflussenden Parameter möglichst realitätsnah abgeglichen werden. Welche Parameter dies im Detail sind und welche Kalibrierungsmöglichkeiten der einzelnen Modellparameter zur Verfügung stehen, hängt von der verwendeten mikroskopischen Simulationssoftware ab und muss von ihr für den verkehrstelematischen Prüfstand in bereits kalibrierter Form zur Verfügung gestellt werden.

3.2.5.2 Kalibrierung des Verkehrstelematiksimulator

Auf der Ebene des Verkehrstelematiksimulators ergibt eine Betrachtung der beteiligten Basiskomponenten durch Vergleich mit real existierenden Pendanten, welche Kalibrierungsmöglichkeiten bereitgestellt werden müssen. Parameter, die keine exakten Wertangaben zulassen, werden als Durchschnittswerte mit einer zugehörigen Schwankung angegeben. Dies ermöglicht es, für vorgegebene Szenarien³⁸ eine repräsentative Menge von Werten in der Realität zu sammeln oder per Recherche von Erfahrungswerten aus der Literatur zu gewinnen, um mit ihnen im Anschluss den Verkehrstelematiksimulator über die Konfiguration zu kalibrieren.

Beginnend mit dem **Übertragungskanal** wird angenommen, dass sein Verhalten in der Realität von übertragungstechnischen Parametern und dem verwendeten Übertragungsprotokoll bestimmt wird.

Übertragungstechnische Parameter werden im Verkehrstelematiksimulator durch folgende Größen beschrieben:

- Durchschnittliche Verzögerungszeit [s]: beschreibt die Zeit zwischen Initiierung der Übertragung einer Nachricht bis zum tatsächlichen Versenden dieser, bedingt durch Verzögerungen im Verbindungsaufbau.
- Durchschnittliche Übertragungsdauer [s]: Dauer der Übertragung. Diese hängt von der Größe der zu übermittelnden Nachricht und der Übertragungsgeschwindigkeit des verwendeten Mediums ab.
- Durchschnittliche Verlustrate von Nachrichten [%]: stellt den prozentuellen Anteil von Nachrichten dar, die bei der Übertragung verworfen werden.
- Durchschnittliche Übertragungreichweite [m]: Radius eines kreisförmigen Übertragungsbereichs um die Sendeposition, innerhalb dessen ein Versand und Empfang von Nachrichten möglich ist.

³⁸ Für weitere Informationen über Szenarien sei auf Abschnitt 3.3 verwiesen.

Wie bei realen Übertragungskanälen werden mit Ausnahme der Übertragungreichweite die oben genannten, technisch bedingten Parameter ebenso vom verwendeten Übertragungsprotokoll beeinflusst. Ein komplexes Protokoll, das verloren gegangene Nachrichten erkennen kann – wie etwa das aus dem World Wide Web bekannte TCP/IP Protokoll – kann garantieren, dass die Verlustrate 0% annehmen wird. Durch dafür zusätzlich benötigte Daten, die für Verwaltungszwecke mit der eigentlichen Nachricht mit übertragen werden, ist jedoch eine Beeinflussung der anderen Parameter gegeben. Diese Beeinflussung des Übertragungsprotokolls ist somit in den Übertragungstechnischen Parametern als mit enthalten anzusehen und wird für das Übertragungsprotokoll nicht mehr mit angegeben.

Die nun für das **Übertragungsprotokoll** verbleibenden Parameter sind:

- Statische Verwaltungsdatengröße [byte]: gibt die Größe von einmalig versendeten Verwaltungsdaten an, die unabhängig von der Größe oder Anzahl der versendeten Nachrichten sind.
- Dynamische Verwaltungsdatengröße [byte]: stellt die Größe der zusätzlich versendeten Verwaltungsdaten pro Nachricht dar.

Die Basiskomponenten Sendeeinheit und Empfangseinheit stellen Bindeglieder zwischen Fahrzeugen, bzw. Zentralen und Übertragungskanälen dar, aus Sicht der Kalibrierbarkeit wurden alle Parameter bereits dem Übertragungskanal zugeordnet und bereits dort erwähnt.

Für die Basiskomponente **Fahrzeug** gilt es, die Ortungstechnologie zu berücksichtigen. Da Fahrzeuge mit unterschiedlichen Ortungstechnologien ausgestattet sein können und diese unterschiedliche Genauigkeit aufweisen, muss dies in der Kalibrierung beachtet werden.

Folgende Parameter sind daher im Verkehrstelematiksimulator für die Basiskomponente Fahrzeug kalibrierbar:

- Durchschnittliche Positionsgenauigkeit [m]: stellt die Genauigkeit dar, mit der die Position des Fahrzeugs ermittelt werden kann.
- Größe einer Position [byte]: gibt die Größe einer Positionsangabe der verwendeten Ortungstechnologie an.

Sowohl die fahrzeugseitige als auch die empfängerseitige Datenverarbeitung stellen in der Realität wie auch im Verkehrstelematiksimulator reine Recheneinheiten dar, sind daher nur durch entsprechende Betriebsparameter zu konfigurieren, müssen aber nicht nach der eingangs verwendeten Definition kalibriert werden.

Ähnliches gilt für die Zentrale, die ortsgebunden Daten über ihre Übertragungskanäle sammelt, über die Datenverarbeitung aufbereitet und gegebenenfalls weiterverteilt. Die Übertragungsseitigen Anteile wurden bereits behandelt, die die Datenverarbeitung betreffenden Teile bedürfen keiner Kalibrierung, somit ist im Verkehrstelematiksimulator auch für die Zentrale keine weitere Kalibrierung nötig.

3.3 Szenarienbasierte Simulation

Sind die zu untersuchenden Komponenten in geeigneter Weise von den Basiskomponenten abgeleitet im Verkehrstelematiksimulator hinterlegt und im Rahmen der Konfiguration mit einer geeigneten Kalibrierung versehen, stehen sie dem verkehrstelematischen Prüfstand zum Betrieb, zur Messung und Analyse zur Verfügung. Welche Messungen dies sein werden, hängt von der umzusetzenden Zielanwendung und der Art der Fragestellung für die anstehenden Untersuchungen ab. Es ist jedoch zu erwarten, dass derartige Untersuchungen nicht nur einen einzigen Messdurchlauf erfordern, sondern eine ganze Messreihe. Daher wird es notwendig, einen Mechanismus vorzusehen, durch den die einzelnen Messdurchläufe eindeutig derart definiert werden, dass der verkehrstelematische Prüfstand damit betrieben werden kann. Diese eindeutige Zusammenstellung aller für den Betrieb notwendigen Anteile wird **Szenario** genannt. Damit erzeugt der verkehrstelematische Prüfstand für jedes Szenario für jede im zugehörigen *Profil*⁹⁹ enthaltene Metrik die darin festgelegten Werte. Um eine Messreihe aufnehmen zu können, genügt es also, eine geeignete Menge von Szenarien zu definieren, mit denen die szenariobasierte Simulation den verkehrstelematischen Prüfstand ansteuern kann, um als Resultat die Werte der Metriken als Messreihe in der Datenbank hinterlegen zu können. Insgesamt ist die szenarienbasierte Simulation somit die höchste steuernde Instanz, die den verkehrstelematischen Prüfstand – der wiederum den Verkehrstelematiksimulator ansteuert – mit Szenarien beaufschlagt und aber ebenso die entstehende Messreihen über die Datenbankverbindung für weiterführende Analysen abspeichert.

Zusammen mit dem verkehrstelematischen Prüfstand und dem Verkehrstelematiksimulator erfüllt die szenarienbasierte Simulation daher die ersten drei Anforderungen aus Abschnitt 3.2:

- Aufnahme der Komponenten des verkehrstelematischen Systems
- Betrieb dieses Systems
- Zugriff auf relevante Kenngrößen in den Komponenten

3.3.1 Kombinationsebenen

Im Kontext verkehrstelematischer Systeme kann die Anzahl der benötigten Szenarien für eine Messreihe aufgrund der Komplexität der beteiligten Komponenten und Parameter sehr groß werden. Um dies zu veranschaulichen, betrachte man folgenden Gedankengang: im Verkehrstelematiksimulator setzen von einer Basiskomponente abgeleitete Komponenten ein spezifisches Verhalten um. Sollen also unterschiedliche Verhalten untersucht werden, wie etwa ein Variantenvergleich von verschiedenen ähnlichen verkehrstelematischen Systemen, so werden jeweils mehrere Komponenten von der entsprechenden Basiskomponente abgeleitet werden. Ein Beispiel wäre eine Datenverarbeitung, die das XFCD-Verfahren umsetzt und eine andere, die das Frequenzdomänenverfahren implementiert. Stehen mehrere Komponenten im Verkehrstelematiksimulator zur Verfügung, so können diese in unterschiedlicher Weise verschalten werden, sofern sie den in Abbildung 16 definierten Restriktionen genügen. Es entstehen verschiedene Kombinationsmöglichkeiten, von denen die für eine Untersuchung interessierenden Kombinationen jeweils in einem Szenario beschrieben werden. Neben der Verschaltung können die Komponenten mit verschiedenen Parametern betrieben werden.

⁹⁹ Für Details über die Basiskomponente *Profil* und die in ihr enthaltenen, von der Basiskomponente Kriterium abgeleiteten Metriken sei auf Abschnitt 3.2.4 verwiesen.

Unterschiedliche Parameter für die gleiche Komponente erzeugen eine weitere Dimension der Kombinationsmöglichkeiten und damit der Szenarien. Werden verschiedene Übertragungsmöglichkeiten mit betrachtet – etwa zentrale Kommunikation im Vergleich zu dezentraler Kommunikation – bilden diese eine weitere Ebene von Kombinationsmöglichkeiten. Übergeordnete Systemparameter wie Verkehrsnetz- und Fahrzeugdaten schließlich eröffnen wieder eine weitere Klasse von Kombinationsmöglichkeiten, ebenso Betrachtungen mit unterschiedlichen Ausstattungsraten.

Die in Summe daraus entstehende Komplexität von Kombinationsmöglichkeiten sollte daher aus Gründen der Handhabbarkeit systematisiert werden. Dazu werden drei Kombinationsebenen eingeführt und in den nachfolgenden Abschnitten vertieft:

- Szenario
- Szenarioklasse
- Messaufbau

Die Kombinationsebenen dienen dazu, nicht jede einzelne der potentiell möglichen Konfigurationen in der Datenbank explizit angeben zu müssen. Die szenarienbasierte Simulation berechnet automatisch aus den Angaben der Kombinationsebenen alle möglichen unterschiedlichen Konfigurationen. Für jede entstehende Konfiguration wird dann von der szenarienbasierten Simulation ein Szenario erstellt, indem dem Szenario zunächst die Konfiguration zugewiesen und im nächsten Schritt die in der Konfiguration geforderten Komponenten über den verkehrstelematischen Prüfstand im Verkehrstelematiksimulator erzeugt und konfiguriert werden⁴⁰. Danach stehen die Komponenten dieses Szenarios für den Betrieb, die Messung und die Analyse zur Verfügung.

Abbildung 17 gibt einen Überblick, wie die Kombinationsebenen zusammenhängen.

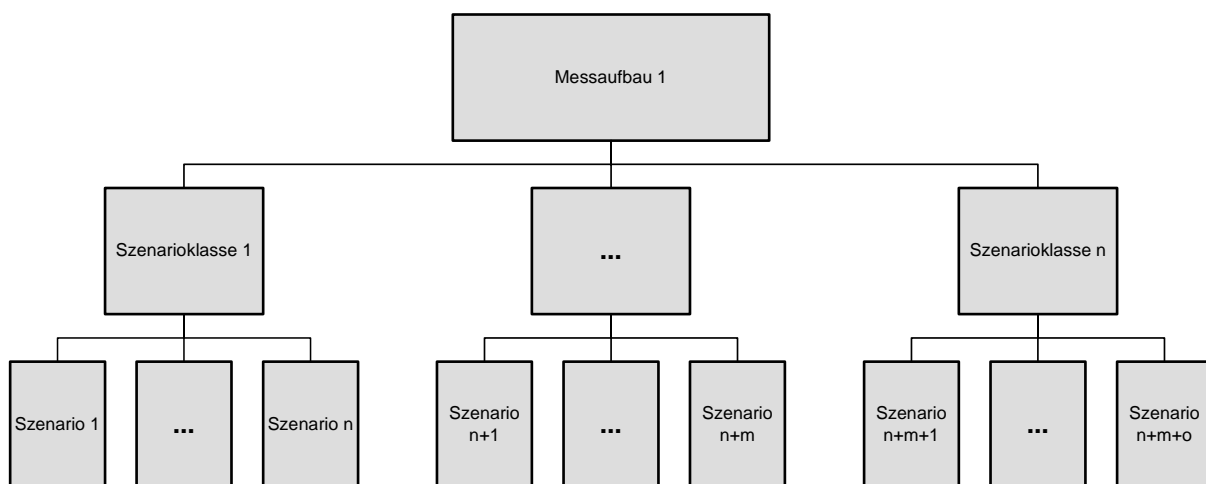


Abbildung 17: Zusammenhang der Kombinationsebenen von Szenarien

⁴⁰ Da die Kalibrierung als Teil der Konfiguration anzusehen ist, werden die Komponenten in diesem Schritt auch kalibriert.

Wie bereits eingangs erwähnt, stellt ein Szenario eine konkrete Kombination dar, mit der der verkehrstelematische Prüfstand angesteuert und betrieben werden kann. Vergleichbare Szenarien können hierbei zu einer Szenarioklasse zusammengefasst werden, das Szenario beschreibt dann eine Einzelausprägung der Szenarioklasse, jedes Szenario unterscheidet sich im Detail etwas von einem anderen Szenario der gleichen Szenarioklasse. Ein Beispiel einer Szenarioklasse wären alle interessierenden Szenarien eines bestimmten telematischen Systems, eine andere Szenarioklasse würde dann die Szenarien eines anderen telematischen Systems zusammenfassen, beide Szenarioklassen setzen jedoch die gleiche Zielanwendung um. Dieses Beispiel kann nun zur Erklärung des Messaufbaus dienen: hier wird definiert, welche Szenarioklassen zusammen, also mit den gleichen Metriken betrachtet werden können.

3.3.1.1 Szenario

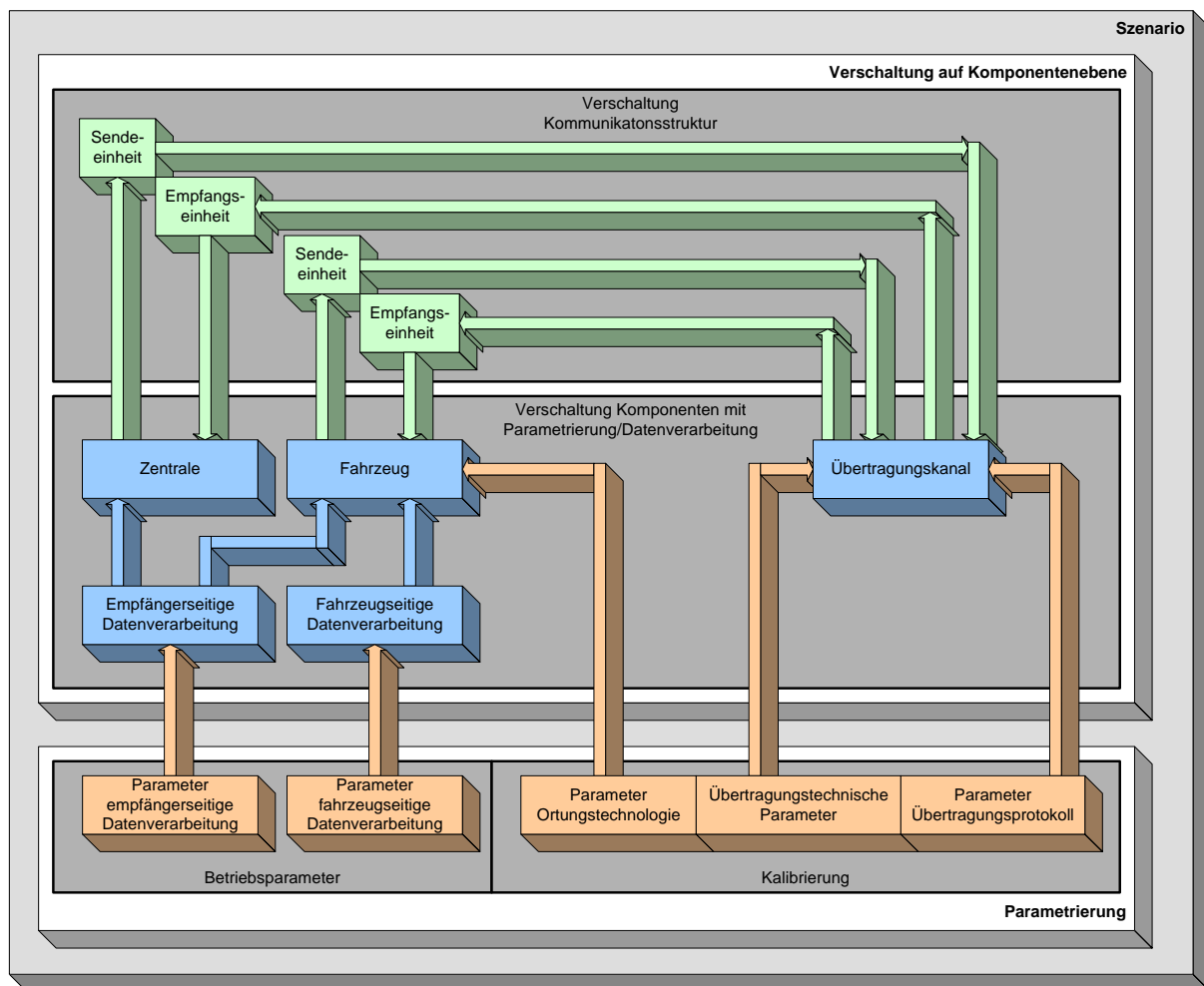


Abbildung 18: Szenario

Das Szenario dient dazu, um einen konkreten Einzelfall im verkehrstelematischen Prüfstand betreiben und messen zu können. Es geht also darum, konkrete Komponenten mit eindeutig definierten Parametern zu versorgen, sowie alle Komponenten zu dem konkreten Einzelfall derart zu verschalten, dass das verkehrstelematische System im Verkehrstelematiksimulator betrieben werden kann. Anders ausgedrückt stellt das Szenario eine der vielen im verkehrstelematischen Prüfstand untersuchbaren Realitäten dar. Es fasst damit die konkrete Parametrierung und alle Verschaltungen der Komponenten zusammen. Welche Parameter vorhanden sind und welche Verschaltungen dabei von Interesse sind, ist in Abbildung 18 illustriert.

Beginnend mit der *Parametrierung* ist festzuhalten, dass sich diese aus der *Kalibrierung* und den *Betriebsparametern* zusammensetzt. Die *Kalibrierung* wurde bereits in Abschnitt 3.2.5 beschrieben und wird hier nicht weiter vertieft. Die *Betriebsparameter* stellen jene Parameter dar, die für Betrieb der Datenverarbeitung benötigt werden. Sie gliedern sich, angelehnt an die Gruppierung der Basiskomponenten, in *Parameter empfängerseitige Datenverarbeitung* und *Parameter fahrzeugseitige Datenverarbeitung*. Welche Parameter dies im Detail sind, ist abhängig von der umzusetzenden Zielanwendung. Alle für die entsprechende Komponente möglichen und interessierenden Parameter werden in der Datenbank hinterlegt. Weitergehende Details zu den einzelnen Parametern sowohl der *Betriebsparameter* als auch der *Kalibrierung* sind im Abschnitt 3.4.1 gesammelt aufgeführt.

Alle im Diagramm dargestellten Pfeile betreffen die Verschaltung. Da das Ziel dieser Verschaltung eine sinnvolle Zusammenstellung von Komponenten im Verkehrstelematiksimulator nach dem in Abbildung 14 definierten verkehrstelematischen System ist, kann hier von der *Verschaltung auf Komponentenebene* gesprochen werden. Diese gliedert sich in drei Verschaltungsarten auf (in Klammer ist die farbliche Markierung aus Abbildung 18 angegeben):

- Verschaltung von Komponenten des Verkehrstelematiksimulators mit der Parametrierung (orange)
- Verschaltung der parametrisierten Datenverarbeitungskomponenten (blau)
- Verschaltung der Kommunikationsstruktur (grün)

Die Verschaltung der Parametrierung bewerkstelligt eine korrekte Kalibrierung derjenigen Komponenten, für die es nach Abschnitt 3.2.5 erforderlich ist, sowie die Bereitstellung der für das jeweilige Szenario definierten Betriebsparameter für die Datenverarbeitung. Sind die Datenverarbeitungen korrekt parametrisiert, so muss die Zuordnung zu den Komponenten *Fahrzeug* und gegebenenfalls⁴¹ *Zentrale* erfolgen. Danach stehen funktionsfähige *Fahrzeuge* und gegebenenfalls *Zentralen*, sowie der oder die kalibrierten *Datenübertragungskanäle* zur Verfügung. Des Weiteren wird über die zu verwendende *Verschaltung Kommunikationsstruktur* definiert, wie diese *Fahrzeuge* und gegebenenfalls *Zentralen* miteinander über den oder die *Datenübertragungskanäle* in Verbindung treten sollen. Da *Sende-* und *Empfangseinheiten* eine reine Vermittlerrolle zwischen *Fahrzeugen/Zentralen* und *Übertragungskanälen* einnehmen, muss für sie keine eigene Verschaltung angegeben werden, ihre Notwendigkeit lässt sich direkt aus der Verschaltung von *Fahrzeugen/Zentralen* mit *Übertragungskanälen* ableiten. Ist eine Verschaltung bezüglich der Kommunikationsstruktur zwischen *Fahrzeugen/Zentralen* und *Übertragungskanälen* vonnöten, so wird für das entsprechende *Fahrzeug* oder die entsprechende *Zentrale* die erforderliche *Sende-* und *Empfangseinheit* automatisch vom Verkehrstelematiksimulator mit erzeugt und mit seinem Besitzer – im Sinne des in Abbildung 16 gezeigten Klassendiagramms der Basiskomponenten des Verkehrstelematiksimulators – verschalten.

3.3.1.2 Szenarioklasse

Eine Szenarioklasse beschreibt eine Menge von zusammenhängenden Szenarien. Der Zusammenhang wird dabei über eine Kategorisierung der Komponenten in Typen hergestellt.

⁴¹ Mit Verweis auf das Klassendiagramm der Basiskomponenten in Abbildung 16 sei angemerkt, dass verkehrstelematische Systeme eine Zentrale nicht zwingend enthalten müssen – wie etwa Systeme basierend auf Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation.

Ein Typ ist in diesem Zusammenhang ein frei wählbarer Begriff, um gleichartige Komponenten zu kennzeichnen. Der Typ wird dann in der Datenbank im Rahmen der Konfiguration abgelegt und ermöglicht es der szenarienbasierten Simulation, für alle Komponenten gleichen Typs vergleichbare Szenarien zu erzeugen. Welche Komponenten davon betroffen sind und wie ihr Zusammenhang ist, wird aus Abbildung 19 ersichtlich.

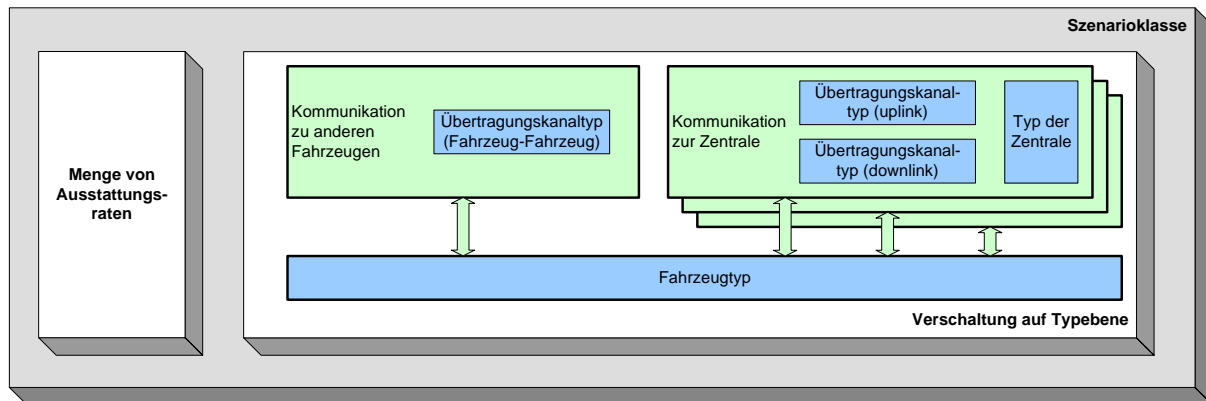


Abbildung 19: Szenarioklasse

Drei Komponenten sind für die Typisierung von Bedeutung: Fahrzeug, Zentrale und Übertragungskanal. Mit Hilfe des Typ-Konzepts ist es nun möglich, Verschaltungen auf höherer Ebene als der reinen Komponentenebene zu definieren: die *Verschaltung auf Typebene*. Ausgehend von einem *Fahrzeugtyp* kann sowohl die *Kommunikation zu anderen Fahrzeugen* als auch die *Kommunikation zur Zentrale* festgelegt werden. Da es im Allgemeinen möglich sein soll, dass Fahrzeuge mit mehr als einer Zentrale kommunizieren, können für den Fahrzeugtyp auch mehrere Kommunikationsmöglichkeiten zu Zentralen angegeben werden. Abgeleitet aus dem in Abbildung 14 dargestellten Datenverarbeitungsprozess von verkehrstelematischen Systemen sind dabei prinzipiell drei Übertragungsarten möglich: der up-link von einem Fahrzeug zu einer Zentrale, der down-link von einer Zentrale zu einem oder mehreren Fahrzeugen und die Fahrzeug-Fahrzeug-Übertragung. Dementsprechend gibt es pro Kommunikation zur Zentrale einen *Übertragungskanal-typ (uplink)* und gegebenenfalls⁴² einen *Übertragungskanal-typ (downlink)*, sowie einen *Übertragungskanal-typ (Fahrzeug-Fahrzeug)* für die Kommunikation zu anderen Fahrzeugen. Die Verschaltung auf Typebene verwendet diese Übertragungskanal-typen zur Festlegung auf die benötigten Übertragungsarten.

Zuletzt ist pro *Kommunikation zur Zentrale* noch der Typ der Zentrale anzugeben, um festzulegen, mit welchem *Typ von Zentrale* der betrachtete *Fahrzeugtyp* kommunizieren soll. Die Kompatibilität von *Fahrzeugtyp* und *Typ der Zentrale* ist von besonderer Wichtigkeit, da die fahrzeugseitig verwendeten Verfahren zur Datenverarbeitung die Daten erzeugen, die die empfängerseitigen Verfahren zur Datenverwertung auf Seite der Zentralen auswerten und verarbeiten können müssen. Auch hier unterstützt das Typ-Konzept: da sowohl Zentralen als auch Fahrzeuge Datenverarbeitungen mit verschiedenen Varianten von Verfahren beinhalten können, kann das verwendete Verfahren bereits im Typnamen von Fahrzeug und Zentrale mit angegeben werden, um so die Übersichtlichkeit zu erhöhen.

⁴² Wie im Klassendiagramm in Abbildung 16 ersichtlich ist, hängt es von der umzusetzenden Zielanwendung ab, ob eine Zentrale einen down-link Übertragungskanal besitzen muss oder nicht.

Vergleicht man die *Verschaltung auf Typebene* mit der *Verschaltung auf Komponentenebene* im Szenario, so fällt auf, dass beide die Verschaltung der Kommunikationsstruktur betreffen. Die Verschaltung auf Komponentenebene leitet sich dabei direkt aus der Verschaltung auf Typebene ab, in dem alle Komponenten zusammengehörigen Typs immer gemäß den Vorgaben der Typebene in gleicher Art und Weise verschalten werden. Wenn beispielsweise auf Szenarioklassenebene festgelegt ist, dass Zentralen vom Typ „City-FCD-Zentrale“ mit Fahrzeugen des Typs „City-FCD-Fahrzeug“ über Übertragungskanäle vom Typ „zentraler Kommunikationskanal“ Daten austauschen sollen, dann kann es auf Szenarioebene mehrere Fahrzeuge vom Typ „City-FCD-Fahrzeug“ geben, die das Verfahren in unterschiedlicher Weise umsetzen. Gleiches gilt für die Zentralen und die Übertragungskanäle. Jetzt können alle möglichen Kombinationen von Verschaltungen von Fahrzeugen, Zentralen und Übertragungskanälen von der szenarienbasierten Simulation für ein konkretes Szenario berechnet werden, solange nur die Typen übereinstimmen.

Die *Verschaltung auf Typebene* ist die höchste Ebene, auf der ein verkehrstelematisches System zusammengestellt werden kann, alle möglichen Kombinationen und damit Szenarien werden aus ihr gemäß den in der Datenbank hinterlegten Konfigurationen erzeugt. Aus übergeordneter Sicht wird ein Szenario eines verkehrstelematischen Systems jedoch auch von der Ausstattungsrate bestimmt. Da es Aufgabe der Szenarioklasse ist, auf übergeordneter Ebene alle Ausprägungen ihrer Szenarien zu definieren, muss die Szenarioklasse auch die *Menge von Ausstattungsraten* vorgeben, mit denen jedes einzelne Szenario betrieben werden soll. Damit ist es dann der szenarienbasierten Simulation möglich, die einzelnen erzeugten Szenarien nicht nur strukturell zu unterscheiden, sondern auch in Hinblick auf die geforderten Ausstattungsraten. Jedem aus der Szenarioklasse erzeugten Szenario wird somit eine einzige Ausstattungsrate zugeordnet.

3.3.1.3 Messaufbau

In den Szenarioklassen werden vergleichbare Szenarien zusammengefasst und beschrieben, um der szenarienbasierten Simulation zu ermöglichen, all diese Szenarien automatisch zu erzeugen und dem verkehrstelematischen Prüfstand zum Betrieb zur Verfügung zu stellen. Da der Prüfstand die Messung und Analyse zum Ziel hat, muss eine Vergleichbarkeit der einzelnen Messdurchläufe gegeben sein. Die Vergleichbarkeit unter den Szenarien wird durch die Szenarioklasse gewährleistet. Es gibt jedoch noch übergeordnete Systemparameter, die darüber hinaus benötigt werden. Sie sind aus Abbildung 20 abzulesen.

Um auf Szenarioklassenebene eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, müssen aus den Szenarioklassen erzeugten Szenarien noch mit den gleichen Eingangsdaten angesteuert werden, um reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen. Diese Eingangsdaten sind durch die *Verkehrsnetzdaten* und der durch die Fahrzeugsteuerung auf diesen *Verkehrsnetzdaten* erzeugten Datenquelle in Form der *Fahrzeugdaten* gegeben. Dadurch können die Szenarien einer Szenarioklasse jeweils mit den gleichen *Fahrzeugdaten* angesteuert werden, um die Vergleichbarkeit zu erreichen. Ähnlich wie auf Typebene die Fahrzeugtypen und Zentralentypen zueinander in der Datenverarbeitung kompatibel sein müssen, ist es für die Verkehrsnetzdaten und speziell die dynamischen Fahrzeugdaten von besonderer Bedeutung, dass sie zusammengehören. Dies wird zwar von der Fahrzeugsteuerung, wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben, gewährleistet, muss aber in der Konfiguration auf Ebene des Messaufbaus korrekt eingetragen werden.

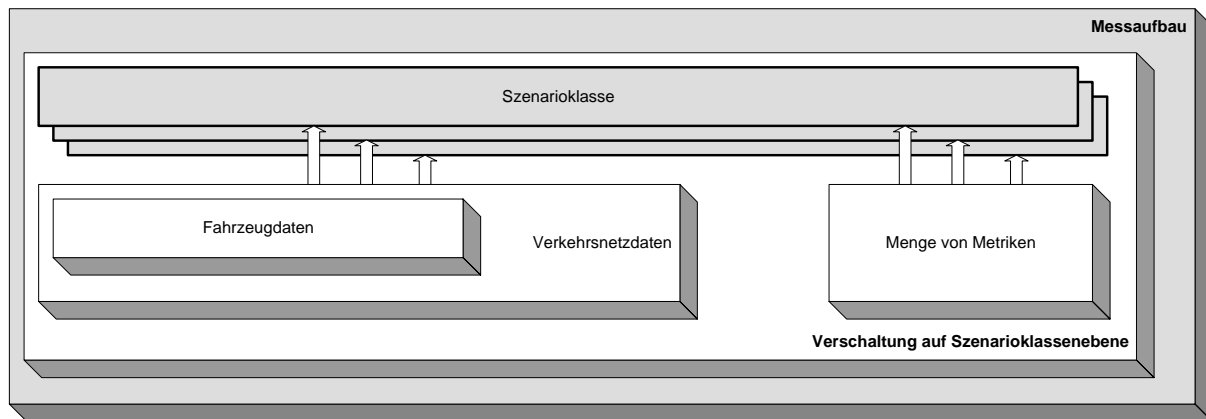


Abbildung 20: Messaufbau

Es ist jedoch genauso möglich, diese Szenarien auf unterschiedlichen *Verkehrsnetzdaten* zu betreiben, um beispielsweise Sensitivitätsanalysen⁴³ durchführen zu können. Mit der zuletzt genannten Möglichkeit eröffnet sich eine weitere Dimension an Kombinationsmöglichkeiten, es ergibt sich die *Verschaltung auf Szenarioklassenebene*: auch hier wird in der Datenbank hinterlegt, welche Szenarioklassen mit welchen *Verkehrsnetzdaten* und den darauf erzeugten *Fahrzeugdaten* betrieben werden soll, die szenarienbasierte Simulation erstellt basierend darauf alle geforderten Szenarien der Szenarioklasse auf den jeweils verschalteten *Verkehrsnetzdaten* und stellt sie – eines nach dem anderen – dem verkehrstelematischen Prüfstand zum Betrieb zur Verfügung.

Die oben genannte Vergleichbarkeit ist von besonderem Interesse, wenn die Szenarien nun tatsächlich untereinander in Beziehung gesetzt, also miteinander verglichen werden sollen. Dieser Vergleich geschieht anhand der *Menge von Metriken*. Da die Szenarioklasse die vergleichbaren Szenarien zusammenfasst, wird im Messaufbau für jede Szenarioklasse diejenige *Menge von Metriken* festgelegt, mit denen jedes einzelne Szenario zu messen ist.

Ein einzelner Messaufbau besteht damit aus den *Verkehrsnetzdaten* mit den zugehörigen *Fahrzeugdaten*, der *Menge von Metriken* und einer oder mehreren *Szenarioklassen*, die damit betrieben werden sollen. Mehrere *Szenarioklassen* werden besonders beim Variantenvergleich von Verfahren zum Tragen kommen: hier können in einer Szenarioklasse alle Ausprägungen des ersten Verfahrens beschrieben werden, in der zweiten diejenigen des zweiten Verfahrens. Die Vergleichbarkeit zwischen den Varianten wird dann anhand der gleichen verwendeten übergeordneten Systemparameter als Eingangswerte und der gleichen Menge von verwendeten Metriken aus Ergebniswerte innerhalb eines Messaufbaus gewährleistet.

Da die Anzahl der zu betreibenden Szenarien auf Ebene des Messaufbaus sehr hoch werden kann, ist der verkehrstelematische Prüfstand skalierbar aufgebaut. Das bedeutet, dass mehrere verkehrstelematische Prüfstände auf verschiedenen Computern aufgebaut werden können, um die zu betreibenden Szenarioklassen auf diese Prüfstände zu verteilen. Einer dieser Prüfstände muss dann als Datenbankserver definiert werden, von ihm beziehen die einzelnen szenarienbasierten Simulationen ihre Konfigurationen zur Erzeugung der Szenarien. Bei ihm laufen auch alle Ergebnisse der verkehrstelematischen Prüfstände zusammen, werden also in einer einzigen Datenbank abgelegt. Welche Szenarioklassen auf welchem verkehrstelematischen

⁴³ Details zur Sensitivitätsanalyse sind Abschnitt 3.5.2 zu entnehmen.

Prüfstand betrieben wird, ist ebenfalls Bestandteil der Konfiguration in der Datenbank. Sämtliche Werte der Konfiguration sind detailliert im Abschnitt 3.4.1 aufgelistet.

3.3.2 Komponentenerzeugung

Die szenarienbasierte Simulation erzeugt mithilfe der drei Kombinationsebenen alle möglichen Szenarien dergestalt, dass für jedes Szenario eindeutig festgelegt ist, wie die Parametrierung und Verschaltung der Komponenten für dieses konkrete Szenario zu erfolgen hat. Diese Informationen sind wie in Abschnitt 3.3.1.1 beschrieben Teil des Szenarios. Noch offen ist, wie diese Konfiguration zu einem im Verkehrstelematiksimulator simulierbaren Szenario wird. Dies geschieht in der szenarienbasierten Simulation, die das Szenario erzeugt, die darin geforderten Komponenten erzeugt und diese mithilfe der im Szenario hinterlegten Konfiguration sowohl parametriert als auch miteinander verschaltet. Davon sind nicht nur die Komponenten des Verkehrstelematiksimulators wie Fahrzeug oder Zentrale betroffen, sondern auch alle Komponenten zur Erzeugung der Metriken – also die für dieses Szenario geforderte, von der Basiskomponente Profil abgeleitete Komponente zur Ansteuerung der Metriken, als auch die Metrik-Komponenten selbst, die wiederum von der Basisklasse Kriterium abgeleitet wurden und auf Ebene des Messaufbaus für das vorliegende Szenario über die Szenarioklasse definiert wurden. Alle diese Komponenten werden nun ebenfalls zum Szenario zusammengefasst, sodass das Szenario nun nicht nur im Kontext der Kombinationsebenen zu sehen ist, sondern als eine der vielen im verkehrstelematischen Prüfstand simulierbaren Realitäten. Aus Sicht der Messung kann damit das gesamte verkehrstelematische System zu diesem Szenario abstrahiert werden und damit die zu Beginn von Abschnitt 3.3 gestellte Forderung erfüllen, dass ein Szenario genau ein Ergebnis eines Messdurchlaufs repräsentiert.

Bei der Erzeugung der Komponenten ist für die Fahrzeuge eine Besonderheit zu beachten: mit Ausnahme der Fahrzeuge existieren alle Komponenten so lange, wie das Szenario innerhalb des verkehrstelematischen Prüfstands existiert. Fahrzeuge hingegen bewegen sich im betrachteten Verkehrsnetz, fahren in das Netz ein oder verlassen es. Über die Szenarioklasse ist für jedes Szenario eine eindeutige Ausstattungsrate vorgeschrieben. Die Auswahl, welche Fahrzeuge nun am betrachteten verkehrstelematischen System partizipieren, muss daher dynamisch während des Messdurchgangs erfolgen. In Vorgriff auf Abschnitt 3.3.3 über den zeitlichen Ablauf wird daher zu jedem Zeitschritt – weitere Details siehe dort – überprüft, ob die vorgegebene Ausstattungsrate erfüllt ist. Sollte dies nicht der Fall sein, werden aus den im aktuellen Zeitschritt neu im Netz einfahrenden Fahrzeugen so lange Fahrzeuge in das verkehrstelematische System aufgenommen, bis die Ausstattungsrate erfüllt ist.

Dabei ist es möglich, nach Fahrzeugarten zu unterscheiden. Diese Fahrzeugarten werden von der Fahrzeugsteuerung vorgegeben, etwa eine Unterscheidung in Personenkraftwagen und Lastkraftwagen. Soll keine Unterscheidung vorgenommen werden, kann auch die spezielle Fahrzeugart „alle“ gewählt werden.

Die Auswahl der partizipierenden Fahrzeuge selbst erfolgt nicht zufällig, sondern in deterministischer Weise, um Messdurchgänge – die eine im Messaufbau angegebene Datenquelle verwenden – reproduzierbar zu gestalten. Hierzu wird aus der Menge der neu hinzugekommenen Fahrzeuge der gewählten Fahrzeugart jedes x -te ausgewählt, falls es erforderlich ist. x berechnet sich dabei aus

$$x = \frac{n}{a \cdot ar - v} \quad \begin{array}{l} \text{für } (a \cdot ar - v) \geq 1 \text{ und} \\ \text{für } x \geq 1 \end{array}$$

mit

n Anzahl der neu hinzugekommenen Fahrzeuge der gewählten Art

a Anzahl aller Fahrzeuge im Verkehrsnetz

ar Ausstattungsrate [%]

v Anzahl bereits partizipierender Fahrzeuge der gewählten Art

Formel 10: Auswahl von Fahrzeugen gemäß Ausstattungsrate

Die Ausstattungsrate ar wird dabei, wie in Formel 1 definiert, als Anteil der partizipierenden Fahrzeuge v am Kollektiv aller Fahrzeuge (aller Fahrzeugarten) a im betrachteten Verkehrsnetz berechnet. $(a \cdot ar)$ ergibt damit die Anzahl der insgesamt benötigten Fahrzeuge, v hingegen stellt die bereits partizipierenden Fahrzeuge der geforderten Fahrzeugart dar. Die Differenz $(a \cdot ar) - v$ ist entsprechend die Anzahl der noch fehlenden Fahrzeuge im verkehrstelematischen System. Ist diese Differenz größer oder gleich Eins, kann mit den im aktuellen Zeitschritt neu hinzugekommenen Fahrzeugen der benötigten Fahrzeugart n berechnet werden, welches jeweils x -te Fahrzeug partizipieren soll. Dazu wird x auf eine ganze Zahl gerundet. Im Falle, dass x kleiner Eins ist, also die Anzahl der für das verkehrstelematische System benötigten Fahrzeuge größer ist als die Anzahl der im Zeitschritt verfügbaren Fahrzeuge, wird x auf Eins gesetzt. Damit wird jedes verfügbare Fahrzeug der erforderlichen Fahrzeugart dem verkehrstelematischen System hinzugefügt. Dies wird in jedem nachfolgenden Zeitschritt wiederholt, bis x wieder größer oder gleich Eins annimmt.

Soll ein Szenario mit einer gegebenen Ausstattungsrate mit mehreren verschiedenen Verkehrsnachfragen oder unterschiedlichen, zufällig gewählten Einfahrzeitpunkten von Fahrzeugen in das Verkehrsnetz untersucht werden, so ist das durch die Fahrzeugsteuerung möglich, die dann mehrere verschiedene Datenquellen zur Verfügung stellen muss, die über den Messaufbau mit den Szenarien über die Szenarioklassen verschalten werden können. Damit können trotz deterministischer Auswahl der partizipierenden Fahrzeuge zufällige Selektionen von Fahrzeugen am Gesamtkollektiv umgesetzt werden, was beispielsweise für Sensitivitätsanalysen⁴⁴ von Interesse sein kann.

Da die beschriebene Komponente zur Auswahl der partizipierenden Fahrzeuge ebenfalls von einer Basiskomponente abgeleitet ist, wäre eine weitere Möglichkeit, eine zweite Komponente von ihr abzuleiten, die ein anderes als das beschriebene Verhalten zur Auswahl der Fahrzeuge umsetzt.

3.3.3 Zeitlicher Ablauf

In zeitlicher Hinsicht steuert die szenarienbasierte Simulation den verkehrstelematischen Prüfstand zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten an:

⁴⁴ Details zur Sensitivitätsanalyse sind Abschnitt 3.5.2 zu entnehmen.

3.3.3.1 Anfang des Messdurchgangs

Bei der initialen Ansteuerung wird das Szenario aus den drei Kombinationsebenen berechnet, ein konkretes Szenario ausgewählt und alle erforderlichen Komponenten gemäß der im Szenario hinterlegten Konfiguration, wie in Abschnitt 3.3.2 beschrieben, erzeugt. Damit ist das Szenario⁴⁵ im verkehrstelematischen Prüfstand betriebsbereit.

3.3.3.2 Zeitschritt

Im nächsten Schritt muss das Szenario mit den benötigten Daten der übergeordneten Systemparameter (Fahrzeugdaten innerhalb eines Verkehrsnetzes) aktualisiert werden. Welche Daten dies sind und aus welcher Quelle sie gespeist werden, wurde im zugehörigen Messaufbau für das Szenario definiert. Diese werden nun im Zeitschrittverfahren von der szenarienbasierten Simulation an den verkehrstelematischen Prüfstand zum Betrieb und zur Messung übergeben. Das verwendete Zeitintervall ist dabei frei wählbar, muss jedoch innerhalb eines Szenarios konstant bleiben. Damit werden die relevanten Komponenten des Verkehrstelematiksimulators aktualisiert, aber auch diejenigen Metrik-Komponenten, für die eine kontinuierliche Aktualisierung gefordert ist. Des Weiteren erfolgt die in Abschnitt 3.3.2 beschriebene Auswahl von am verkehrstelematischen System partizipierenden Fahrzeugen. Erst wenn alle Daten des aktuellen Zeitschritts verarbeitet sind, geht die szenarienbasierte Simulation zum nächsten Zeitschritt über.

3.3.3.3 Ende des Messdurchgangs

Am Ende eines Messdurchgangs erfolgt von der szenarienbasierten Simulation eine Anfrage an das Szenario über seine Messergebnisse. Da das Szenario sämtliche Komponenten des Verkehrstelematiksimulators kennt und damit auch die Profil-Komponente, kann es die Anfrage an diese weiterleiten, welche wiederum alle enthaltenen Metrik-Komponenten der Reihe nach abfragt und so ein Profil als Ergebnis eines Messdurchgangs zurückliefert. Das Szenario übergibt dieses an die szenarienbasierte Simulation, die es in der Datenbank hinterlegt.

Damit ist dieses Szenario, bzw. der damit verbundene Messdurchgang beendet. Die szenarienbasierte Simulation geht zum nächsten Szenario der Szenarioklasse über und beginnt wieder mit der initialen Ansteuerung.

3.4 Datenbank

Die szenarienbasierte Simulation hält die Verbindung zu der Datenbank vor. Die Datenbank gliedert sich in ihrer Struktur in zwei Bereiche: die Konfigurationen in den drei Kombinationsebenen, die die szenarienbasierte Simulation ausliest, um die benötigten Szenarien für die Messreihen zu berechnen, zu erzeugen, zu betreiben und zu vermessen und die Messwerte, in denen die daraus resultierenden Ergebnisse in weiterverarbeitbarer Form abgespeichert werden.

⁴⁵ Wie in Abschnitt 3.3.2 bereits erwähnt, kann das für ein Szenario erzeugte verkehrstelematische System vereinfachend zum Szenario selbst abstrahiert werden und wird im Nachfolgenden auch in dieser Schreibweise verwendet.

Ist die Umsetzung der benötigten Komponenten des verkehrstelematischen Systems in Software für die gewünschten Anwendungsfälle abgeschlossen, beschränkt sich die weitere Arbeit auf die Bearbeitung der Datenbank, in der die interessierenden Kombinationen von Szenarien zu hinterlegen und die Simulationen über die szenarienbasierte Simulation anzustoßen sind, um die entstehenden Messreihen für weiterführende Analysen zur Verfügung zu stellen. Zusammen mit der szenarienbasierten Simulation erfüllt damit die Datenbank die letzte noch verbleibende, zu Beginn von Abschnitt 3.2 festgelegte Anforderung: die Aufzeichnung der Werte der Metriken.

3.4.1 Konfiguration

In den Tabellen der Konfiguration werden die Messaufbauten, Szenarioklassen und Szenarios für die durchzuführenden Messdurchläufe, wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, parametrisiert und verschaltet. In Abbildung 21 sind diejenigen Tabellen der Datenbank dargestellt, die die Kombinationsebenen Messaufbau und Szenarioklasse betreffen, Abbildung 22 zeigt die Tabellen der Kombinationsebene Szenario, zur besseren Übersichtlichkeit in der gleichen farblichen Kodierung wie in Abbildung 18 für die Kombinationsebene Szenario und in Abbildung 19 für die Kombinationsebene Szenarioklasse verwendet.

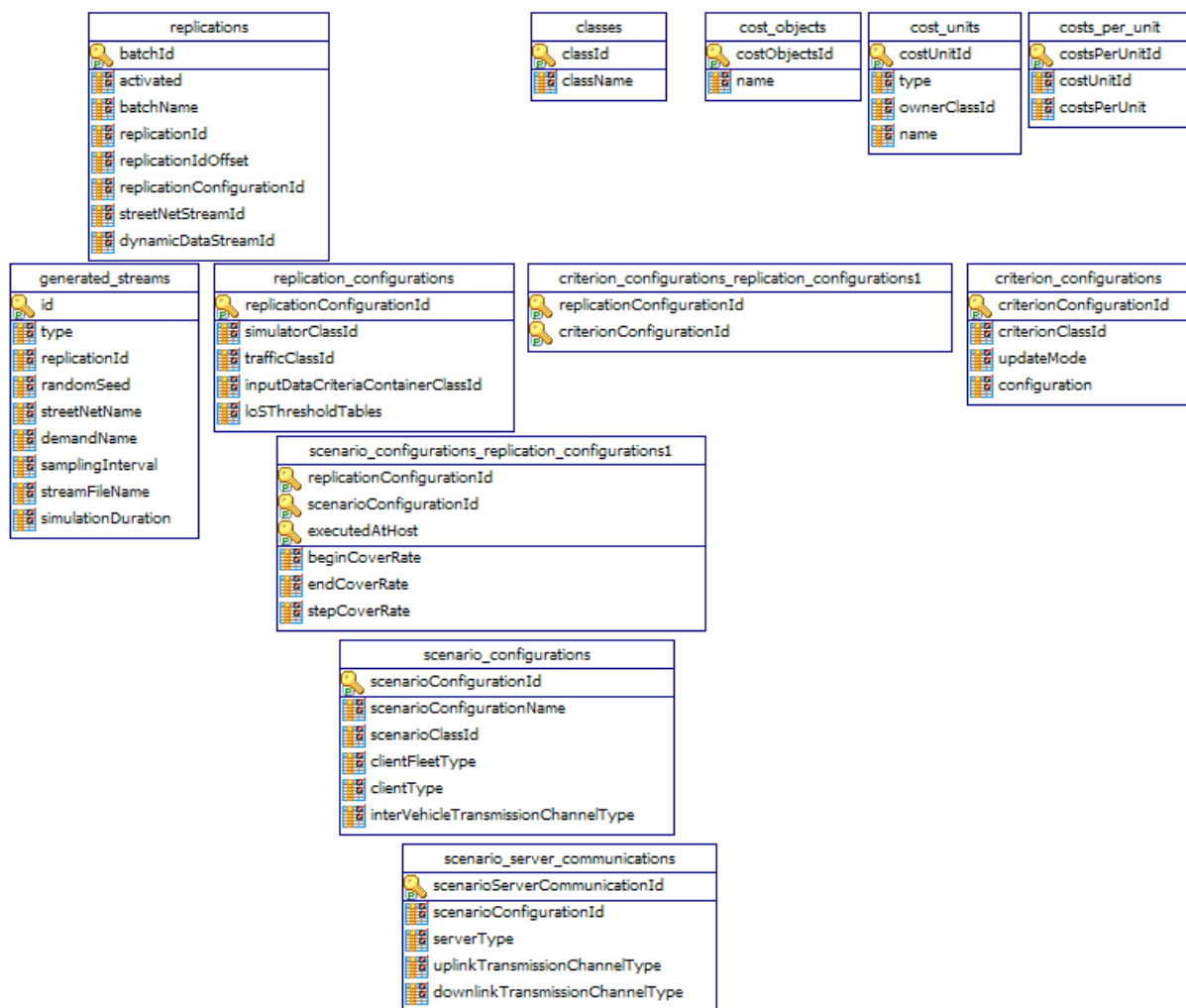


Abbildung 21: Datenbanktabellen der Kombinationsebenen Messaufbau und Szenarioklasse

Nachfolgend wird auf Tabellenebene beschrieben, welche Tabelle welchem Zweck dient und wie diese Tabellen zusammenhängen. Ebenso werden im Folgenden weitere Service-Komponenten der szenarienbasierten Simulation genannt, die bisher unerwähnt geblieben sind. Da in den vorangegangenen Abschnitten der Fokus auf die Beschreibung der Methodik zur Messung an verkehrstelematischen Systemen lag, wurde darin nur die Funktion der Service-Komponenten beschrieben, nicht jedoch ihr Name genannt. Im vorliegenden Abschnitt jedoch sind diese Komponenten aus den Datenbanktabellen ersichtlich und werden an geeigneter Stelle kurz beschrieben. Für eine darüber hinausgehende Beschreibung jeder einzelnen Spalte der genannten Tabellen sei auf die mehrseitige Referenz in Tabelle 13 des Anhangs verwiesen.

3.4.1.1 Kombinationsebene Messaufbau

Auf Ebene des Messaufbaus sind die Datenbanktabellen *replications*, *replication_configurations*, *criterion_configurations*, *generated_streams* und die Verschaltungstabelle *criterion_configurations_replication_configurations1* von Bedeutung.

Die Tabelle *replications* bildet dabei das Verzeichnis aller Messaufbauten und legt fest, wie diese zu konfigurieren sind, welche aufgezeichnete Datenquelle (Verkehrsnetzdaten und Fahrzeugdaten) jeweils zu verwenden ist – diese wird durch eine in der Tabelle *generated_streams* vergebene Identifikationsnummer eindeutig beschrieben, welche das Verzeichnis aller aufgezeichneten Datenquellen darstellt – und stellt die Möglichkeit bereit, im Verzeichnis der Messaufbauten zwar alle definierten Messaufbauten aufzulisten, aber nur einzelne davon für Simulationen zu aktivieren. Wie die einzelnen Messaufbauten zusammengesetzt sind, wird über die Tabelle *replication_configurations* festgelegt. Hauptfunktion dieser Tabelle ist die Bereitstellung von Messaufbau-Konfigurationen mit einer eindeutigen Identifikationsnummer, die für nachfolgend beschriebene, weitere Konfigurationen verwendet werden. Daneben wird in ihr festgeschrieben, welche Service-Komponenten zu verwenden sind: die zu verwendende Profil-Komponente – wie in Abschnitt 3.2.4 erwähnt – zur Ansteuerung der Metriken, eine Simulator-Komponente, die von der szenarienbasierten Simulation zur Ansteuerung des verkehrstelematischen Prüfstands verwendet wird und die Traffic-Komponente, mit der die szenarienbasierte Simulation Fahrzeuge mit Fahrzeugdaten aktualisieren kann.

Über die erwähnte Identifikationsnummer für Messaufbau-Konfigurationen kann die Tabelle *replication_configurations* nun mit den Tabellen *criterion_configurations* und *scenario_configurations* über die Verschaltungstabellen *criterion_configurations_replication_configurations1*, bzw. über die Verschaltungstabelle *scenario_configurations_replication_configurations1* verbunden werden, um die Konfiguration des Messaufbaus zu beschreiben. In letztgenannter Tabelle kann ebenso angegeben werden, auf welchem Computer die Simulationen durchgeführt werden sollen, wenn mehrere Computer an den Simulationen beteiligt sind. Die Tabelle *criterion_configurations* beschreibt dabei das Verzeichnis aller Metriken, in ihr werden für jede mögliche Metrik die Aktualisierungsfrequenz und gegebenenfalls zusätzliche Parameter angegeben. Ob dies erforderlich ist, wird von der entsprechenden Metrik-Komponente vorgegeben. Die Metriken werden hierbei ebenfalls über Metrik-Konfigurationen mit einer eindeutigen Identifikationsnummer beschrieben. In der Verschaltungstabelle *criterion_configurations_replication_configurations1* können dann Paare von Identifikationsnummern jeweils einer Messaufbau-Konfiguration und einer Metrik-Konfiguration angegeben werden, womit eine m:n-Verschaltung umgesetzt werden kann. Das bedeutet, dass für eine Messaufbau-Konfiguration

mehrere Metrik-Konfigurationen festgeschrieben werden können, aber auch, dass jede Metrik-Konfiguration in mehr als einer Messaufbau-Konfiguration verwendet werden kann.

3.4.1.2 Kombinationsebene Szenarioklasse

Die Verschaltungstabelle *scenario_configurations_replication_configurations1* stellt die Verschaltung zu den Tabellen der Ebene der Szenarioklasse dar: *scenario_configurations* und *scenario_server_communications*. Die Tabelle *scenario_configurations* listet dabei alle Szenarioklassen anhand von Szenarioklassen-Konfigurationen mit einer eindeutigen Identifikationsnummer auf. In ihr werden die in Abschnitt 3.3.1.2 eingeführten Typen für eine Szenarioklasse festgelegt: für das Fahrzeug, den Übertragungskanal (Fahrzeug-Fahrzeug) und der Typ für eine weitere Servicekomponente, die eine Fahrzeugflotte beschreibt, also alle partizipierenden Fahrzeuge eines verkehrstelematischen Systems bei einer gegebenen Ausstattungsrate zusammenfasst. Ebenso wird in dieser Tabelle definiert, welche Szenario-Komponente zu verwenden ist, eine Service-Komponente der szenarienbasierten Simulation, die alle Komponenten eines Szenarios, wie in Abschnitt 3.3.2 beschrieben, zusammenfasst und die Erzeugung der Messwerte steuert.

Die Tabelle *scenario_server_communications* listet die verschiedenen Kommunikationsstrukturen von Fahrzeugen zu Zentralen auf. Es wird anhand der Identifikationsnummer der Szenarioklassen-Konfiguration festgelegt, für welche Szenarioklasse jeweils welche Kommunikationsstruktur gelten soll, d.h. welcher Typ der Zentrale, welcher Übertragungskanaltyp im up-link und welcher im down-link zu verwenden ist. Sind die Szenarioklassen dergestalt definiert, können sie über die Verschaltungstabelle *scenario_configurations_replication_configurations1* mit den Messaufbauten verbunden werden. Auch hier ist eine m:n-Beziehung über die Vergabe von Paaren von Identifikationsnummern gegeben – zum einen anhand der Nummer der Messaufbau-Konfiguration und zum anderen durch die der Szenarioklassen-Konfiguration.

Darüber hinaus werden in dieser Verschaltungstabelle die in Abschnitt 3.3.1.2 beschriebene Menge von zu verwendenden Ausstattungsraten angegeben, sowie der Rechnername, sollten die Simulationen auf mehrere Computer parallelisiert werden.

Die Tabellen *classes*, *cost_objects*, *cost_units* und *costs_per_unit* sind nicht direkt dem Messaufbau und der Szenarioklasse zuzuordnen, sie sind jedoch von übergeordneter Bedeutung und werden deswegen hier genannt. In der Tabelle *classes* findet sich ein zentraler Katalog aller in der szenarienbasierten Simulation, dem verkehrstelematischen Prüfstand und dem Verkehrstelematiksimulator verwendeten und über die Datenbank konfigurierbaren Komponenten. Der verwendete Identifikator ist systemweit eindeutig und wird in den bereits genannten Tabellen immer dann verwendet, wenn der Bezug zu einer Komponente hergestellt werden soll.

Die verbleibenden Tabellen der Abbildung 21 werden für die Kostenberechnung verwendet, Details zur Kostenberechnung sind in Abschnitt 3.6.1.2 zu finden. In der Tabelle *cost_objects* werden dafür alle Kostenträger anhand von Identifikationsnummer und Name aufgelistet. Die Tabelle *cost_units* stellt ein Verzeichnis der anfallenden Arten von Kostenmengen dar, in ihr werden für eine Kostenmenge ihre Identifikationsnummer, ihr Name, aber auch die Kostenart (Anschaffungs-, Fix-, oder variable Kosten) und die Nummer der Komponente, wie in der Tabelle *classes* festgelegt, genannt, die die Kostenmenge verursacht. Die Stückkosten werden

schließlich in der Tabelle *costs_per_unit* verzeichnet, indem für eine Kostenmenge anhand ihrer Identifikationsnummer die Stückkosten angegeben werden.

3.4.1.3 Kombinationsebene Szenario

Für die Kombinationsebene Szenario sind Tabellen zur Festlegung der Komponenten des Verkehrstelematiksimulators, für die Parametrierung sowie die betreffenden Verschaltungen in der Datenbank vorgehalten und in Abbildung 22 dargestellt.

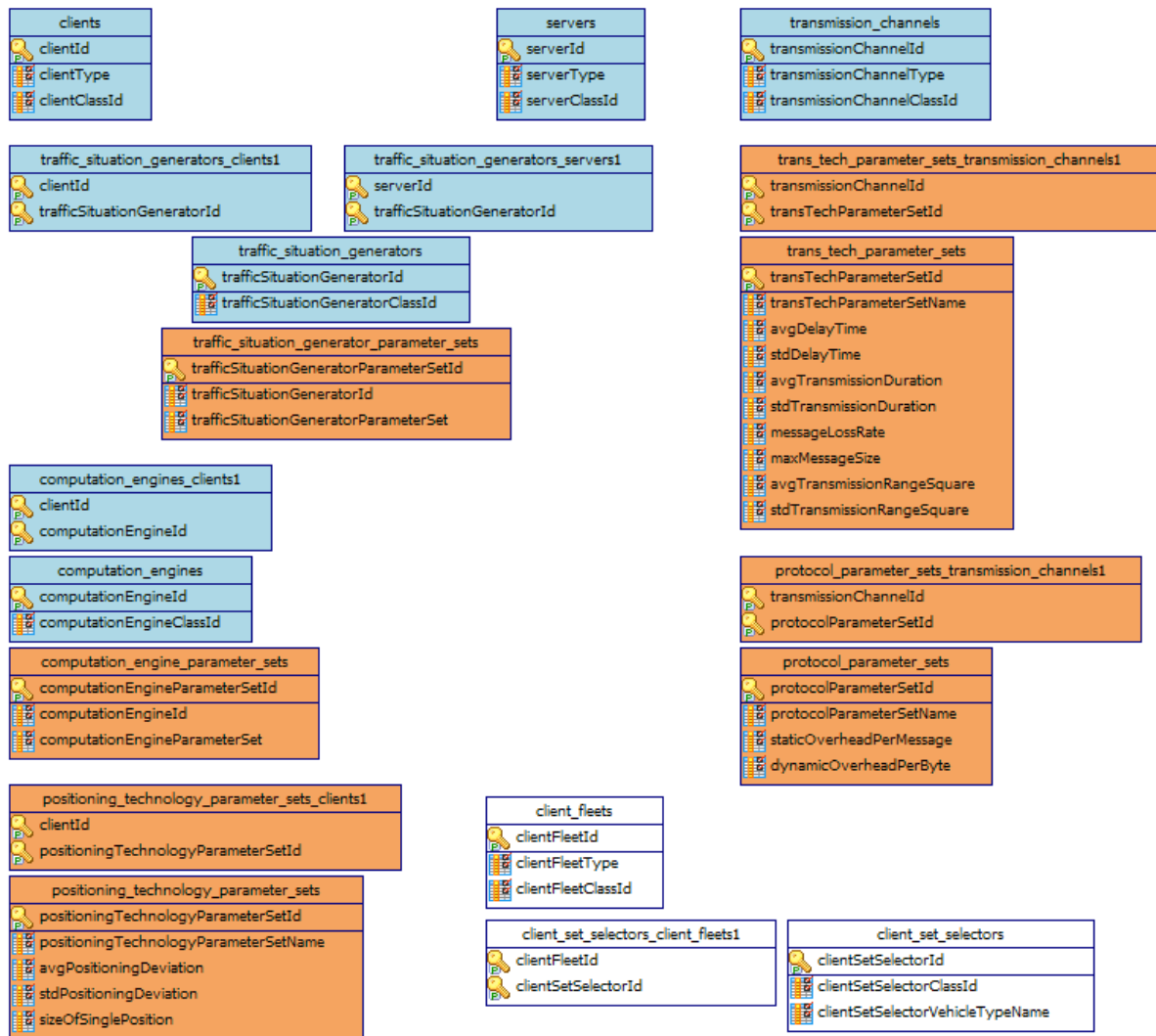


Abbildung 22: Datenbanktabellen der Kombinationsebene Szenario

Die Tabellen *clients*, *servers*, *transmission_channels* und *client_fleets* bilden dabei jeweils das Verzeichnis der Fahrzeuge, Zentralen, Übertragungskanäle sowie der bereits erwähnten Service-Komponente für Fahrzeugflotten. Diese werden durch eine eindeutige Identifikationsnummer, einen frei wählbaren Typnamen für die Verschaltung auf Szenarioklassenebene und die Nummer der Komponente – wie in der Tabelle *classes* vorgegeben – beschrieben.

In den Tabellen *traffic_situation_generators* und *computation_engines* werden jeweils die empfängerseitigen und fahrzeugseitigen Datenverarbeitungseinheiten anhand einer eindeutigen

Identifikationsnummer und der zu verwendenden Komponentennummer aus der Tabelle *classes* aufgelistet. Die Tabellen *traffic_situation_generators_clients1* und *traffic_situation_generators_servers1* bilden dabei die Verschaltungstabellen von Fahrzeugen, bzw. Zentralen mit den empfängerseitigen Datenverarbeitungseinheiten. Die Verschaltung geschieht durch die bekannte Systematik der Paare von Identifikationsnummern. Gleiches gilt für die Verschaltung von Fahrzeugen mit den fahrzeugseitigen Datenverarbeitungseinheiten anhand der Verschaltungstabelle *computation_engines_clients1*.

Die für die empfängerseitigen und fahrzeugseitigen Datenverarbeitungseinheiten benötigten **Betriebsparameter** sind jeweils in den Tabellen *traffic_situation_generator_parameter_sets*, bzw. *computation_engine_parameter_sets* hinterlegt. Diese Tabellen beinhalten neben der eindeutigen Identifikationsnummer jeweils einen frei wählbaren Text, dessen Format – etwa eine kommasetrennte Liste von Betriebsparametern – von der zugeordneten Datenverarbeitungseinheit vorzugeben ist. Diese Zuordnung geschieht anhand der Identifikationsnummer der Datenverarbeitungseinheit und ist ebenso Bestandteil der genannten beiden Tabellen.

Bezüglich der **Kalibrierung** sind die Tabellen *positioning_technology_parameter_sets*, *trans_tech_parameter_sets* und *protocol_parameter_sets* für Kalibrierungswerte der Ortungstechnologie, Übertragungstechnik und des Übertragungsprotokolls zu nennen. Die einzelnen Spalten in diesen Tabellen wurden bereits in Abschnitt 3.2.5.2 erläutert, sind in der Tabelle 13 des Anhangs in der Referenztafel nochmals mit den zu verwendenden Einheiten aufgeführt und werden deswegen hier nicht weiter beschrieben. Die Verschaltungstabellen *positioning_technology_parameter_sets_clients1*, *trans_tech_parameter_sets_transmission_channels1* und *protocol_parameter_sets_transmission_channels1* stellen schließlich wieder nach bekannter Systematik die Verbindung zu den Fahrzeugen, bzw. den Übertragungskanälen her.

Die Tabelle *client_set_selectors* bildet das Verzeichnis aller Komponenten, die aus dem Gesamtkollektiv der Fahrzeuge gemäß einer Ausstattungsrate am verkehrstelematischen System partizipierende Fahrzeuge auswählen können. In Abschnitt 3.3.2 wurde im Rahmen der Komponentenerzeugung beschrieben, wie dies im verkehrstelematischen Prüfstand umgesetzt wird. Ein Eintrag ist dabei durch eine eindeutige Identifikationsnummer, die Komponentennummer wie in Tabelle *classes* definiert und die zu verwendende Fahrzeugart gegeben. Soll die Berücksichtigung von Fahrzeugarten deaktiviert werden, kann „all“ als Fahrzeugart eingetragen werden. Die Verbindung zur Fahrzeugflotte wird in bekannter Art anhand der Paare von Identifikationsnummern über die Verschaltungstabelle *client_set_selectors_client_fleets1* hergestellt.

3.4.2 Messwerte

Die Messwerte werden von den für die jeweilige Zielanwendung festgelegten Metriken bereitgestellt und in einer Datenbanktafel hinterlegt. Die Spalten dieser Tabelle sind demnach im Gegensatz zu den Tabellen der Konfiguration von Abschnitt 3.4.1 nicht festgelegt, sondern werden von der *Profil*-Komponente⁴⁶ in Abhängigkeit von den in ihr enthaltenen *Kriterium*-Komponenten vorgegeben. In der *Profil*-Komponente wird auch der Name der Tabelle in der

⁴⁶ Details zur *Profil*-Komponente sind in Abschnitt 3.2.4 zu finden.

Datenbank festgelegt. Zur Unterscheidung von Konfigurationstabellen zu erzeugten Tabellen, wird letztgenannten automatisch das Präfix „generated_“ vorangestellt.

Im Laufe der Simulation wird für jeden Messdurchlauf eine Zeile in dieser Tabelle eingetragen. Sind alle Messdurchläufe abgearbeitet, liegt in dieser Tabelle ein vollständiges – in dem Sinne wie durch die Konfiguration vorgegebenes – Profil des verkehrstelematischen Systems für die zu untersuchende Zielanwendung vor. Für ein konkretes Beispiel sei auf den Anwendungsfall im Abschnitt 4 verwiesen.

3.5 Analyse in der Verkehrstelematik

Als Analyse ist die „...systematische Untersuchung eines Sachverhalts unter Berücksichtigung seiner Teilaspekte“ zu verstehen [BIB06]. Betrachtet man den Begriff Teilaspekte im Kontext der Verkehrstelematik näher und legt die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebene Methodik zur Messung in der Verkehrstelematik zugrunde, so kann festgehalten werden, dass Informationen über die Teilaspekte eines verkehrstelematischen Systems bereits in der Messung anhand der Metriken gesammelt werden. Ebenso wurde in der Messung bereits die umzusetzende Zielanwendung als Untersuchungsgegenstand eingeführt, sodass die allgemeine Definition der Analyse für die Verkehrstelematik zur „Systematischen Untersuchung der umzusetzenden Zielanwendung unter Berücksichtigung der Metriken“ präzisiert werden kann.

3.5.1 Zielanwendungsabhängige Analyse

Welcher Art diese systematischen Untersuchungen sind, hängt von der umzusetzenden Zielanwendung des verkehrstelematischen Systems ab und den verfolgten Zielen ab. Sie ist für die Methodik zur Messung und Analyse in der Verkehrstelematik daher nicht vereinheitlicht festlegbar. Die Grundlage für die Analysen in Form der Bereitstellung einer geeigneten Methodik zur Messung, sowie ein geeignetes Rahmenwerk, das die Messung und die Analyse in aufeinander abgestimmter Form bereitstellt, ist dagegen Bestandteil der Methodik. Mögliche Analysearten werden in diesem Abschnitt beleuchtet, für eine konkrete Anwendung sei auf den Anwendungsfall in Abschnitt 4 verwiesen.

Ist das Ziel die Optimierung eines das System umsetzenden Verfahrens bezüglich bestimmter Charakteristika, so ist im verkehrstelematischen Prüfstand eine geeignet Menge an Metriken zu hinterlegen, die diese Charakteristika ausreichend beschreiben. Die anschließende Messung kann dann so lange mit variierenden Eingangsparametern durchgeführt werden, bis die gewünschte Optimierung als ausreichend erscheint.

Sollen hingegen verfahrensübergreifende Vergleiche angestellt werden, so ist zunächst eine Systematik festzulegen, welche Charakteristika der verschiedenen Systeme jeweils zu erfassen sind und wie diese – bei zu erwartender unterschiedlicher Natur der Charakteristika jedes einzelnen Verfahrens – verfahrensübergreifend vergleichbar gemacht werden können. Die aus dieser Systematik abgeleitete Menge an zu erfassenden Charakteristika kann dann wiederum im verkehrstelematischen Prüfstand als Metriken hinterlegt und vermessen werden. Dieser Gedanke ist vergleichbar mit einer Nutzwertanalyse, wie sie in [SCB97]⁴⁷ beschrieben wird. Dies ist eine umfangreich und allgemein definierte Methode mit dem Ziel der vergleichbaren Bewertung von

⁴⁷ [SCB97], S. 385ff

Entscheidungsalternativen oder Projekten. Die Detailtiefe dieser Methode ist beachtlich, daher muss im Einzelfall für die umzusetzende Zielanwendung entschieden werden, ob und wie weit dieser Methode gefolgt wird.

Ist das Ziel der Untersuchungen die Ermittlung eines Kosten/Nutzenoptimums, so muss zuerst festgelegt werden, wie der Nutzen eines verkehrstelematischen Systems in der umzusetzenden Zielanwendung zu definieren ist – entweder unter Befolgung der bereits erwähnten Methodik der Nutzwertanalyse oder durch Definition eigener, der konkreten umzusetzenden Zielanwendung besser entsprechenden Kriterien. In beiden Fällen wird sich der Nutzen aus messbaren Charakteristika des verkehrstelematischen Systems zusammensetzen müssen, die wiederum anhand geeigneter Metriken im verkehrstelematischen Prüfstand vermessen werden können. Da die Metriken nicht nur auf die technische Dimension beschränkt sind, sondern auch Kostenmengen aufzeichnen können, können zusammen mit einer geeigneten Kostenstruktur die Kosten dem Nutzen gegenübergestellt werden. Wiederholte Messdurchgänge bei Variation der Eingangsgrößen werden dann verschiedene Kosten/Nutzen-Kombinationen erzeugen, die im Vergleich zum Auffinden des Kosten/Nutzenoptimums geeignet sind.

Werden den so erfassten Kosten einer umzusetzenden Zielanwendung auch Einnahmen gegenübergestellt, sind Break-Even-Analysen [KIS99] mit Einschränkungen ebenso denkbar. Diese geht vereinfacht davon aus, dass von Stückzahlen abhängige Kosten ab einem gewissen Punkt von den für diese Stückzahlen erzielten Erträge kompensiert werden, dieser Punkt wird dann der Break-Even-Punkt genannt. Bei weiter steigenden Stückzahlen wird das System dann profitabel. Die Aufzeichnung der Kosten kann dabei vom verkehrstelematischen Prüfstand übernommen werden, die Berechnung der Erträge jedoch nur so weit, wie diese aus den im verkehrstelematischen Prüfstand vorhandenen Größen wie etwa die Kostenmengen berechnet werden können. Mit einem Ertrag pro Stück kann so der Ertrag errechnet werden.

Über diese technischen und wirtschaftlichen Analysen hinausgehend sind volkswirtschaftliche Untersuchungen, etwa über die Emissionen oder den Kraftstoffverbrauch, direkt aus den Fahrzeugen über ihre Geschwindigkeit möglich [SCB97].

3.5.2 Sensitivitätsanalyse

Von besonderem Interesse im Rahmen der Methodik ist die Sensitivitätsanalyse. *„In der Sensitivitätsanalyse (= „Empfindlichkeitsanalyse“) wird der Einfluss von Inputfaktoren (einzeln oder gemeinsam) auf bestimmte Ergebnisgrößen untersucht. Die Analyse kann mathematisch durch das Analysieren von Modellgleichungen erfolgen oder auch durch die Verwendung von variierten einzelnen Inputfaktoren (Iterationsverfahren)“* [WIK08]. Der szenarienbasierte Aufbau des verkehrstelematischen Prüfstands unterstützt dabei das genannte Iterationsverfahren, in dem in den Konfigurationen die interessierenden Eingangsgrößen einer Variation unterzogen werden und die Messwerte der Metriken dann nach Aufzeichnen der Messreihen einer Sensitivitätsanalyse unterzogen werden können. Diese Analyseart kann für die Untersuchung der Stabilität von verkehrstelematischen Systemen gegenüber bestimmten Eingangsgrößen verwendet werden, für die Methodik dient sie jedoch noch einem weiteren Zweck: mit ihr kann die Zuverlässigkeit der Methodik verifiziert werden. Da die Methodik nur dann von Nutzen sein kann, wenn sie zuverlässig reproduzierbare Ergebnisse erzeugen kann, müssen die Einflüsse der Eingangsparameter auf die Ergebnisse bekannt sein. Schwankungen in den Ergebnissen, die rein der Methodik zuzuschreiben sind,

sollten dabei möglichst eliminiert werden. Für den in Abschnitt 4 definierten Anwendungsfall wird dafür in Abschnitt 4.4.1.2 festgelegt, welche Sensitivitätsanalysen durchgeführt wurden, die Ergebnisse und die Analyse sind dann in Abschnitt 4.5.2 niedergeschrieben.

3.6 Regelkreise

Die in der Methodik verankerten Anteile zur Messung und die Möglichkeiten zur Analyse greifen ineinander, bauen aufeinander auf und bedingen sich gegenseitig. Die erzielten Messergebnisse stehen der Analyse zur Verfügung, im Rahmen der Analyse werden Erkenntnisse gewonnen, die wieder zu weiteren Messungen führen können. Es entsteht ein Regelkreis, in dem sich Messung und Analyse in zeitlicher Reihenfolge ablösen.

3.6.1.1 Regelkreis der Messung

Als Einstieg in diesen Regelkreis steht zu Beginn die Festlegung der Zielanwendung des verkehrstelematischen Systems. Die Zielanwendung definiert den Rahmen, der auf alle nachfolgenden Schritte Einfluss hat.

Ist die Zielanwendung festgelegt, muss die Auswahl des verkehrstelematische Systems erfolgen. Dies kann ein bereits existierendes System sein oder ein neu zu entwickelndes, bei Variantenvergleichen können dies auch mehrere Systeme sein. Innerhalb des Systems sind die verwendeten Verfahren mit in dieser Auswahl zu berücksichtigen. Die benötigten Komponenten des Systems sind im Verkehrstelematiksimulator zu hinterlegen oder wiederzuverwenden.

Ist die Kommunikationsstruktur noch nicht durch das verkehrstelematische System vorgegeben, ist diese im nächsten Schritt zu definieren. Damit ist auf hoher Ebene das verkehrstelematische System für die Zielanwendung festgelegt.

Das Einsatzgebiet dieses Systems muss im nächsten Schritt in Form der zu verwendenden Fahrzeugsteuerung und der Verkehrsnetzdaten, auf denen sie aufbaut, geklärt werden. Es muss geklärt werden, welche Rohdaten für das System benötigt werden und die resultierenden Datenquellen verfügbar gemacht werden.

Ist dies geschehen, müssen die Szenarien beschrieben werden, in denen das verkehrstelematische System betrieben werden soll und welche für die Messungen geeignet sein müssen. Dies geschieht durch Festlegung der Messaufbauten, Szenarioklassen und Szenarien. Die Metriken müssen in diesem Schritt ebenso klar definiert werden, damit keine Szenarien für die benötigten Messreihen fehlen. Aus den Metriken kann sich die Notwendigkeit ergeben, Erweiterungen des verkehrstelematischen Prüfstands vorzunehmen.

Sind alle diese Schritte abgearbeitet, alle Komponenten im verkehrstelematischen Prüfstand vorhanden und alle Konfigurationen in der Datenbank hinterlegt, kann mit der Messung begonnen werden.

Nach Abschluss der Messungen stehen die Messreihen in der Datenbank für die Analyse zur Verfügung. Die Erkenntnisse der Analyse ergeben dann, ob eine weitere Regelschleife anhand erneuter Messungen, gegebenenfalls mit neuen oder modifizierten Metriken oder veränderten

Konfigurationen in der Datenbank, durchlaufen werden muss. Dies kann beliebig wiederholt werden, bis die Analyse ergibt, dass keine weitere Messung mehr nötig ist.

3.6.1.2 Regelkreis der Kosten

Sollen wirtschaftliche Aspekte betrachtet werden, die auf Untersuchungen von Kosten basieren, entsteht ein zweiter Regelkreis. Kosten entstehen im Allgemeinen durch Anwendung einer Kostenstruktur auf eine Kostenmenge. Mit Kostenstruktur sei in diesem Zusammenhang eine Kombination von Stückkosten und Kostenträgern verstanden, die basierend auf einer Kostenmenge zu Kosten für den Kostenträger führt, indem die Kostenmenge mit den Stückkosten versehen und dem Kostenträger zugeordnet wird. So können wirtschaftliche Aspekte verkehrstelematischer Systeme mit betrachtet werden, etwa im Rahmen einer Geschäftsmodellierung, in der festgelegt wird, wer für welche Kosten aufzukommen hat und wie die Erträge erwirtschaftet werden können.

Diese Analysen wirtschaftlicher Natur werden verschiedene Kostenstrukturen betrachten, um so zu einem wirtschaftlichen Optimum zu gelangen. Die Kostenmengen für diese Untersuchungen werden dafür als gegeben betrachtet. Aus diesem Grund werden im verkehrstelematischen Prüfstand wie in Abschnitt 3.2.4 beschrieben keine Kosten im Rahmen von Messdurchläufen aufgezeichnet, sondern nur die Kostenmengen. Diese werden getrennt für Anschaffungskosten, Fixkosten und variablen Kosten aufgezeichnet.

Nachdem die Kostenmengen in der Datenbank hinterlegt wurden, kann der zweite Regelkreis der Kosten beginnen, der die Kostenmengen aus der Datenbank ausliest, eine Kostenstruktur appliziert, die resultierenden Kosten analysiert und als Ergebnis gegebenenfalls die Kostenstruktur verändert, um in die nächste Regelschleife einzutreten und diese Kostenstruktur wieder auf die Kostenmengen anwendet, bis die gewünschten Ergebnisse bezüglich der Kosten erreicht wurden.

Eine auf die Datenbank des verkehrstelematischen Prüfstands abgestimmte Applikation unterstützt diesen Regelkreis und ist in Abschnitt 3.7.4 kurz beschrieben.

3.7 Anwendungsfallunabhängige Umsetzung der Methodik

Die Methodik zur Messung und Analyse in der Verkehrstelematik besteht ebenso aus einer konkreten, jedoch anwendungsfallunabhängigen Umsetzung der Methodik. Die Umsetzung der Anwendungsfälle soll auf dieses generische Rahmenwerk aufbauen können, das für jeden Anwendungsfall⁴⁸ wiederverwendet werden kann, um sich so bei der Untersuchung des Anwendungsfalls rein auf diesen konzentrieren zu können. Sofern für das Verständnis der Methodik notwendig, wurden Teile der Umsetzung – wie etwa die Tabellen der Datenbank – bereits im entsprechenden Teil der Methodik erwähnt, die nicht genannten Teile sowie ein Gesamtüberblick über den technischen Aufbau der Umsetzung wird in den nachfolgenden Abschnitten erläutert. Die Ausführungen orientieren sich dabei an dem in Abbildung 15 eingeführten Aufbau des verkehrstelematischen Prüfstands.

⁴⁸ Sofern das zu untersuchende verkehrstelematische System Abbildung 14 genügt und gemäß den Einschränkungen, die im Abschnitt 3.2.1 über die Datenquelle gemacht wurden.

3.7.1 Fahrzeugsteuerung und Datenquelle

Da der verkehrstelematische Prüfstand für den Umstand des Informationsmangels bei verkehrstelematischen Systemen Abhilfe schaffen soll, also Systeme untersucht werden sollen, mit denen in realen Feldversuchen die Grenzen des ökonomisch machbaren voraussichtlich deutlich überschritten werden würden, ist als Fahrzeugsteuerung die mikroskopische Simulation gewählt worden. Da mikroskopische Simulationssysteme zwar eine Vielzahl von Untersuchungen des Verkehrsgeschehens ermöglichen, jedoch keines der bekannten Systeme die geforderte Aufnahme von gesamten telematischen Ketten bereitstellt, war es wichtig, ein Simulationssystem zu finden, das einerseits auf dem aktuellen Stand der Technik bezüglich der Simulation des Fahrverhaltens ist und andererseits eine Schnittstelle zu den entstehenden Daten bietet, um sie für das zu entwickelnde Rahmenwerk abgreifen zu können. Darüber hinaus ist es für die Realitätsnähe der Untersuchungen von Bedeutung, dass ein realistisches, nicht triviales Verkehrsnetz zur Verfügung steht und dieses idealerweise mit Verkehrsstärkezahlungen im realen Verkehrsnetz kalibriert wurde. In [MAT07] wurde ein umfangreiches, städtisches Verkehrsnetz dieser Art in AIMSUN aufgebaut und in kalibrierter Form für die vorliegende Arbeit dankenswerterweise von der Autorin bereitgestellt. Da AIMSUN [TSS05a] ebenso die genannten Kernanforderungen erfüllt und vor allem eine umfangreiche und gut dokumentierte Applikationsschnittstelle bietet [TSS05b], wurde es als Simulationssystem ausgewählt. Sollte das vorliegende Verkehrsnetz für die Untersuchungen nicht ausreichend sein, bietet AIMSUN auch die Möglichkeit, beliebige Verkehrsnetze zu modellieren und kalibrieren, die dann ähnlich dem vorliegenden Netz für den verkehrstelematischen Prüfstand verwendet werden können.

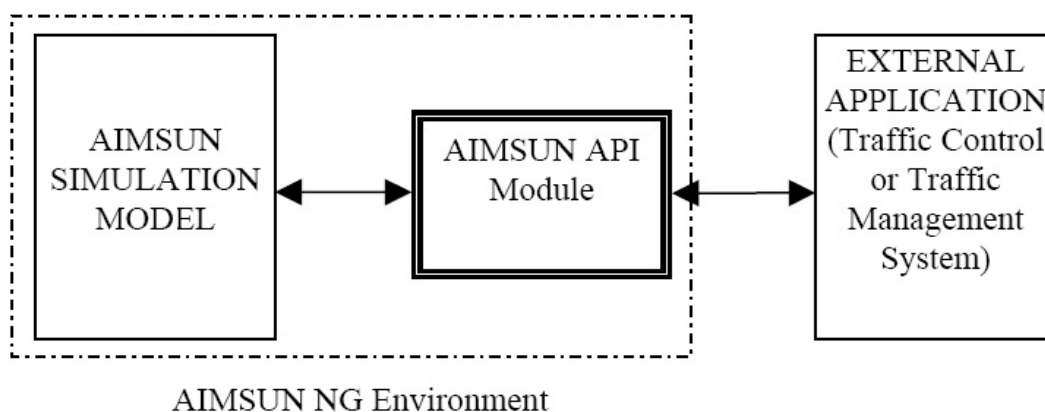


Abbildung 23: Applikationsschnittstelle in AIMSUN [TSS05b]

Wie aus Abbildung 23 ersichtlich, ist diese Schnittstelle bidirektional, kann also nicht nur zum Abgreifen der Fahrzeugdaten verwendet werden, sondern auch wieder mit AIMSUN interagieren. Die externe Applikation hingegen ist nicht, wie in der Abbildung angegeben, durch ein Verkehrsmanagementsystem, sondern den verkehrstelematischen Prüfstand⁴⁹ gegeben.

Die Anbindung des verkehrstelematischen Prüfstands erfolgt dabei als Modul, das in AIMSUN geladen wird und von AIMSUN angesteuert wird. In dieser Konstellation bedeutet dies, dass

⁴⁹ Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird im Folgenden vom verkehrstelematischen Prüfstand gesprochen, obwohl die höchste steuernde Instanz der Methodik eigentlich durch die szenarienbasierte Simulation gegeben ist. Die szenarienbasierte Simulation wird nur dann explizit erwähnt, wenn speziell ihr eigene Funktionalität angesprochen wird.

AIMSUN und der verkehrstelematische Prüfstand zugleich auf einem Computer betrieben werden. Aufgrund der Größe und Komplexität des verwendeten Verkehrsnetzes von Hannover sind sehr viele Fahrzeuge pro Zeitschritt zu bearbeiten, deren Einzelbewegungen in AIMSUN und deren Interaktionen im verkehrstelematischen System zusammen mit etwaigen Zentralen im verkehrstelematischen Prüfstand berechnet werden müssen. Dies sind sehr rechenintensive Operationen, die im Fall von AIMSUN mehrere Tage und im Fall des verkehrstelematischen Prüfstands mehrere Monate Rechenzeit implizieren. Daher wird es notwendig, neben dem parallelen Betrieb auch einen entkoppelten Betrieb der beiden Systeme bereitzustellen.

Im entkoppelten Betrieb wird im ersten Schritt festgelegt, welche unterschiedlichen Kombinationen von statischen und dynamischen Verkehrsnetzdaten in AIMSUN simuliert werden sollen. Diese werden dann nacheinander in AIMSUN abgearbeitet, die entstehenden Fahrzeugdaten (statische und dynamische) jedes Simulationslaufs werden dann als Ergebnis in der Datenbank als mögliche Datenquelle für den Verkehrstelematiksimulator, wie in Abbildung 24 dargestellt, hinterlegt. Jede Datenquelle beinhaltet dabei die Verkehrsnetzdaten sowie für jeden simulierten Zeitschritt die Fahrzeugdaten. Da das Datenaufkommen für ein großes Verkehrsnetz sehr hoch werden kann, muss für ausreichend Speicherplatz auf dem Simulationsserver gesorgt werden – für den in Abschnitt 4 vorgestellten Anwendungsfall betrug der Speicherbedarf etwa 400 Gigabyte.

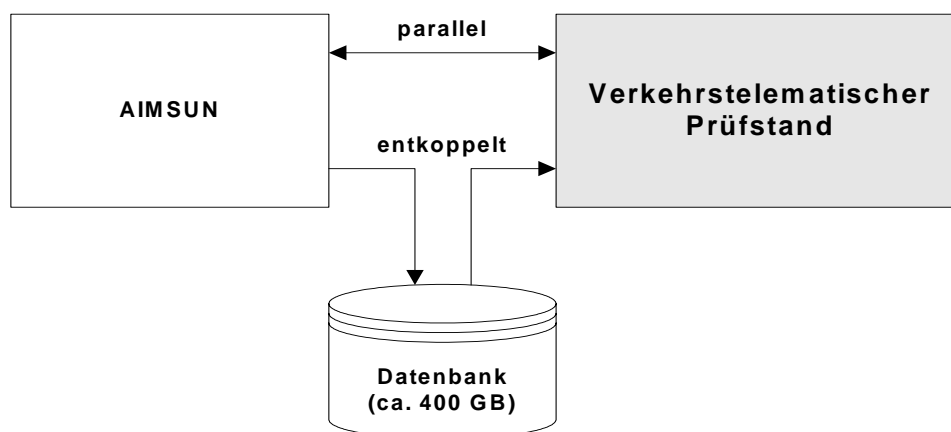


Abbildung 24: Betriebskoppelungen von AIMSUN und verkehrstelematischem Prüfstand

Sind alle Datenquelle auf diese Art erzeugt, können sie auf Ebene des Messaufbaus im Rahmen der Konfiguration für die zu untersuchenden Szenarien verwendet werden. Der verkehrstelematische Prüfstand kann dann ohne AIMSUN auf diesen Datenquellen arbeiten, indem er die Daten in der gleichen Reihenfolge ausliest, wie sie im parallelen Betrieb von AIMSUN geliefert werden würden. Dies stellt sich dann für den verkehrstelematischen Prüfstand so dar, als ob AIMSUN parallel laufen würde. Da der verkehrstelematische Prüfstand der Problematik des Informationsmangels abhelfen soll, ist von vielen Messdurchläufen auszugehen. Liegen die Datenquellen vor, können vom verkehrstelematischen Prüfstand im entkoppelten Betrieb auf die eben beschriebene Weise alle gesuchten Szenarien ohne Interaktion seitens des Benutzers abgearbeitet werden, was den entkoppelten Betrieb zum zu bevorzugenden Modus macht.

Der parallele Betrieb hingegen ist zwingend vonnöten, wenn die Entkopplung der Systeme wegen einer nötigen Rückkoppelung aus dem verkehrstelematischen Prüfstand auf die

Fahrzeugsteuerung nicht erfolgen kann. Ebenso ist er von Interesse, wenn die grafischen Kontrollmöglichkeiten von AIMSUN im zeitlichen Kontext mit dem verkehrstelematischen System zu überprüfen sind, also etwa wenn Messergebnisse nicht plausibel erscheinen und eine qualitative Überprüfung der Fahrzeugdaten mit den Zwischenergebnissen des verkehrstelematischen Systems im gleichen Zeitschritt erfolgen muss.

Das schon erwähnte hohe Rechenaufkommen kann durch die automatische Berechnung von möglichen Kombinationen der Kombinationsebenen in Szenarien von Anwendungsfall zu Anwendungsfall schwanken, es ist jedoch anzunehmen, dass er so hoch sein wird, dass eine Verteilung der Rechenlast auf mehrere Computer notwendig wird. Dies ist in der Architektur des verkehrstelematischen Prüfstands derart vorgesehen, dass die Simulationen über die Konfiguration auf Messaufbauebene – wie in Abschnitt 3.4.1.1 erwähnt – auf diese Computer verteilt werden können, es jedoch im gesamten Netzwerk nur einen Datenbankserver gibt, in dem sämtliche Konfigurationen hinterlegt und alle Ergebnisse der Messdurchläufe abgespeichert werden. Der konkurrierende Zugriff auf diese Netzwerkressource ist dabei durch die Datenbank gewährleistet.

Programmtechnisch ist der verkehrstelematische Prüfstand in der Programmiersprache JAVA⁵⁰ [SUN06] implementiert, die Module der Applikationsschnittstelle von AIMSUN müssen jedoch nach Vorgabe der Applikationsschnittstelle in der Programmiersprache C++ geschrieben sein. Damit die beiden Programme miteinander kommunizieren können, ist eine von JAVA bereitgestellte Zwischenschicht namens JNI (JAVA Native Interface) [SUN03] nötig.

Die für verkehrstelematische Systeme von AIMSUN über die Applikationsschnittstelle zur Verfügung stehenden Daten sind vielfältig und im Detail in [TSS05b] als Referenznachschlagewerk aufgelistet, die wichtigsten fahrzeugrelevanten Daten sind nachfolgend aufgezählt:

Dynamische Fahrzeugdaten:

- Identifikationsnummer des aktuellen Segments/Knotens des Verkehrsnetzes
- Identifikationsnummer der Fahrspur innerhalb des Segments
- Gegenwärtige Position des Fahrzeugs im aktuellen Segment, gemessen als Distanz zum Segmentanfang [m]
- Gegenwärtige Position des Fahrzeugs als X/Y-Koordinate
- Aktuelle Geschwindigkeit [km/h]
- Seit Eintritt ins Verkehrsnetz gefahrene Distanz [m]
- Identifikationsnummer des Vorgängersegments
- Identifikationsnummer der Fahrspur innerhalb des Vorgängersegments
- Identifikationsnummer des nächsten zu befahrenden Segments
- Identifikationsnummer der Fahrspur innerhalb des nächsten zu befahrenden Segments
- Zeitpunkt des Eintritts in das Verkehrsnetz
- Zeitpunkt des Eintritts ins aktuelle Segment

⁵⁰ JAVA wurde wegen des Vorhandenseins wiederverwendbarer Programmteile, einfacherer Anbindung an Datenbanken und weiteren implementierungstechnischen Gründen gewählt.

Statische Fahrzeugdaten:

- Identifikationsnummer des Fahrzeugs
- Fahrzeugart (Pkw, Lkw, ...)
- Länge und Breite des Fahrzeugs [m]
- Maximale Wunschgeschwindigkeit des Fahrers [km/h]
- Maximale Beschleunigung [m/s^2]
- Maximale Verzögerung unter normalen Bedingungen [m/s^2]
- Maximale Verzögerung in kritischen Situationen [m/s^2]
- Akzeptanzgrad von Geschwindigkeitsbeschränkungen
- Minimaler Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug [m]
- Zeitspanne, nach der der Fahrer in Wartesituationen aggressiver wird [s]
- Akzeptanzgrad von Fahrempfehlungen
- Identifikationsnummer des Einfahrknotens des Verkehrsnetzes
- Identifikationsnummer des Zielknotens des Verkehrsnetzes
- Identifikationsnummer der Buslinie, falls das Fahrzeug ein öffentlicher Bus ist

Welche dieser Daten für die Fahrzeugsteuerung verwendet werden, hängt von der umzusetzenden Zielanwendung innerhalb des Verkehrstelematiksimulators ab.

3.7.2 Verkehrstelematiksimulator und Metriken

Alle in den vorangegangenen Abschnitten eingeführten Basiskomponenten des verkehrstelematischen Systems im Verkehrstelematiksimulator, der Metriken im verkehrstelematischen Prüfstand, der Erzeugung und Ansteuerung der Szenarien der szenarienbasierten Simulation, sowie die genannten Servicekomponenten sind im Rahmenwerk des verkehrstelematischen Prüfstands in JAVA umgesetzt. Neben diesen Komponenten existiert eine große Zahl an weiteren Komponenten, die aus programmtechnischen Gründen für die Schaffung dieses Rahmenwerks notwendig sind. Viele davon sind jedoch für das Verständnis der Methodik und ihres umsetzungsseitigen Kerns nicht notwendig und bleiben hier unerwähnt. Diejenigen Ausnahmen, die noch nicht erwähnte Aspekte beschreiben, werden im Folgenden erläutert.

Sowohl die fahrzeugseitige als auch die empfängerseitige Datenverarbeitung setzen konkrete Verfahren einer verkehrstelematischen Applikation um. Die darin enthaltenen Algorithmen können frei in JAVA im Verkehrstelematiksimulator als abgeleitete Komponenten implementiert werden. Sollen bereits existierende Verfahren untersucht werden, liegen die Algorithmen bereits in unterschiedlicher Form implementiert vor. Für diese bereits vorliegenden Softwareteile ist es vorteilhaft, Mechanismen vorzusehen, um sie mit möglichst geringem Adaptierungsaufwand im verkehrstelematischen Prüfstand wiederverwenden zu können.

Aus technischer Sicht ist dabei das Vorliegen des Quellcodes am vorteilhaftesten. Das bedeutet, dass der Algorithmus in Textform in der jeweiligen Programmiersprache vorliegt, es besteht volle Einsicht in die Details der Implementierung, was es für die Integration in den Verkehrstelematiksimulator für etwaige Anpassungen am einfachsten macht. Das heißt aber auch, dass alle Verfahrensdetails für den Untersuchenden im verkehrstelematischen Prüfstand offenliegen, was bei proprietären Verfahren für den Entwickler des Verfahrens ein ernsthaftes

Risiko darstellt – und etwaige Vergleiche von Verfahrensvarianten schwierig und schnell politisch werden lässt.

Eine Abhilfe schafft hier die Verwendung von Binärcode: während Quellcode menschenlesbarer Klartext ist, die jedoch für das Ausführen auf Computern noch von speziellen Programmen (Compiler oder Interpreter genannt) in eine maschinenlesbare Form übersetzt werden muss, ist der Binärcode vom Menschen direkt nicht lesbar. Somit verschwinden die mit hohem finanziellem Forschungsaufwand entwickelten Verfahrensdetails in einem Gewirr aus Nullen und Einsen. Die Integration in den verkehrstelematischen Prüfstand gestaltet sich dann aber deutlich schwieriger, ohne eine klare Beschreibung der Schnittstelle (vor allem ein- und ausgehenden Daten) sogar unmöglich. Mit einer adäquaten Beschreibung jedoch ist es aus technischer Sicht möglich.

Eine weitere Möglichkeit ist für Verfahren, die sich noch im Forschungsstadium befinden, vorgesehen. Da das Mathematikprogramm MATLAB [TMA04] eine geeignete Entwicklungsumgebung von mathematikbasierten Verfahren darstellt, ist auch eine Anbindung an MATLAB vorgesehen, die es ermöglicht, in MATLAB geschriebene Programme in die entsprechenden Datenverarbeitungskomponenten des verkehrstelematischen Prüfstands zu integrieren. Die in Abbildung 24 gezeigten Schnittstellen des verkehrstelematischen Simulators zu externen Programmen erweitern sich damit endgültig zu Abbildung 25.

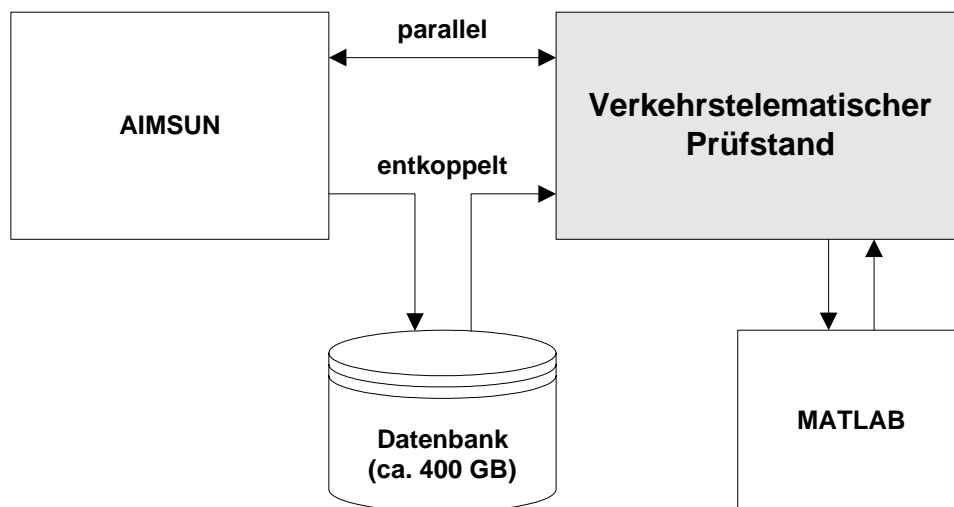


Abbildung 25: Schnittstellen zu externen Programmen

Zusammenfassend sind folgende Möglichkeiten zur Integration von Verfahren vorgesehen:

- Quellcode liegt in JAVA vor: hier können die vorhandenen Teile direkt in die entsprechende Komponente integriert werden
- Quellcode liegt in C++ vor: über das bereits in Abschnitt 3.7.1 erwähnte JNI können diese Teile direkt in die entsprechende Komponente integriert werden
- Binärcode: mit einer klaren Schnittstellenbeschreibung ist die Integration ebenso über das in Abschnitt 3.7.1 erwähnte JNI möglich
- MATLAB: da MATLAB selbst eine Schnittstelle zur Programmiersprache C (der nicht-objektorientierten Variante von C++) bietet, kann die Integration ebenso über das bereits in Abschnitt 3.7.1 erwähnte JNI erfolgen

3.7.3 Datenbank

Die Datenbank wurde durch eine MySQL-Datenbank [MYS04] umgesetzt, die über JDBC (JAVA Database Connectivity) [SUN02] an die szenarienbasierte Simulation angebunden ist. Die Tabellen wurden bereits in anwendungsfallunabhängiger Form im Abschnitt 3.4 beschrieben und sind im Abschnitt 7.1 des Anhangs detailliert als Referenz verfügbar. Der bei MySQL mitgelieferte MySQL Query Browser bietet uneingeschränkten Zugriff auf die Daten der Datenbank, mit ihm können die Konfigurationen in der Datenbank komfortabel eingegeben und wieder ausgelesen werden.

3.7.4 Analyseinstrumente

Die vom verkehrstelematischen Prüfstand erzeugten und in der in Abschnitt 3.4.2 genannten Tabelle hinterlegten Messwerte stehen nach den Messdurchläufen der weiteren Analyse zur Verfügung. Da diese Tabelle in ihrem Aufbau von den in der umzusetzenden Zielanwendung verwendeten Metriken abhängt, muss ein geeignetes Analyseinstrument damit umgehen können. Hierfür existieren zwei Möglichkeiten:

- Evaluator
- Microsoft Excel

Der Evaluator ist nicht direkt Bestandteil des verkehrstelematischen Prüfstands, wurde aber speziell für die Auswertung der von ihm erzeugten Messwerte erstellt. Er setzt auf der Datenbank auf und kann sowohl die Messwerte der technischen Charakteristik als auch die der wirtschaftlichen Charakteristik verarbeiten. Es können Graphen auf den Daten der Datenbank erstellt werden, für Analysen wie etwa die Nutzwertanalyse können einfache Linearkombinationen von Spalten gebildet und als neue Spalten in der Datenbank hinterlegt werden. Er ist somit als Analyseinstrument für den Regelkreis der Messung geeignet.

Darüber hinaus ist er auch in der Lage, die erzeugten Kostenmengen aus dem Regelkreis der Messung zu lesen und mit Kostenstrukturen zu verbinden, um daraus Kosten zu erzeugen. Die Definition der Kostenstrukturen, sowie die Erzeugung der resultierenden Kosten aus den Kostenmengen können mit dem Evaluator vorgenommen werden. Damit eignet er sich ebenso für den Regelkreis der Kosten.

Sollte der Funktionsumfang des Evaluators für Auswertungszwecke nicht ausreichen, besteht als Rückfalllösung die Möglichkeit, die Datenbank in eine Microsoft Excel-Tabelle zu exportieren. Der bei MySQL mitgelieferte MySQL Query Browser bietet dafür die technischen Voraussetzungen, die Inhalte von Datenbanktabellen können mit seiner Hilfe per Knopfdruck einfach in eine Excel-Tabelle exportiert werden. Damit stehen die umfangreichen Tabellenverarbeitungsfunktionen und Darstellungsoptionen von Excel ebenso für die Analyse zur Verfügung.

4 Anwendungsfall Verkehrsinformation mit Floating Car Data

Die in Abschnitt 3 beschriebene Methodik ist generisch ausgelegt und gilt unter den genannten Einschränkungen für verkehrstelematische Systeme, in Abschnitt 3.7 wurde die dazugehörige, anwendungsfallunabhängige Umsetzung der Methodik erläutert. In den folgenden Abschnitten soll die Methodik anhand eines konkreten Anwendungsfalls validiert werden. Ziel dabei ist die Demonstration, dass mit der Methodik dem Umstand des Informationsmangels für die untersuchten verkehrstelematischen Systeme abgeholfen werden kann, also Messreihen für nachfolgende Analysen bereitgestellt werden können. Ob die ausgewählten verkehrstelematischen Systeme dabei gute Ergebnisse erzielen, ist von zweitrangiger Bedeutung, diese könnten dann in potentiellen, nachfolgenden Optimierungsschritten iterativ verbessert werden.

4.1 Zielanwendung

Ein prominenter wie auch schwieriger Vertreter von verkehrstelematischen Systemen ist durch Floating Car Data Systeme gegeben, die in Abschnitt 2.2 vorgestellt und analysiert wurden. Unter Beibehaltung der in Abschnitt 2.2.4 für die Analyse getroffenen Einschränkungen ist die Zielanwendung dieser Systeme die Rekonstruktion einer netzweiten Verkehrslage. Diese sowohl in technischer als auch in wirtschaftlicher Hinsicht herausfordernden verkehrstelematischen Systeme zeichnen sich durch eine komplexe Verteilung der Datenverarbeitung auf Fahrzeuge und ggf. Zentralen aus, verwenden unterschiedliche Kommunikationsstrukturen und sind, wie aus der Gegenüberstellung des Abschnitts 2.2.4 zu entnehmen ist, durchaus heterogen bezüglich ihres Ortsbezugs, ihrer implizite Störungsdefinition und des Einsatzgebiets. Aus diesen Gründen erscheint die Verwendung von **Floating Car Data Systemen mit der Zielanwendung Rekonstruktion der netzweiten Verkehrslage** als Anwendungsfall geeignet.

4.2 Untersuchte Floating Car Data Verfahren

Um eine repräsentative Auswahl an zu untersuchenden Floating Car Data Verfahren zu treffen, kann Tabelle 9 des Abschnitts 2.2.4.1 verwendet werden, in der die Verfahren bezüglich ihres Ortsbezugs, der impliziten Störungsdefinition und des Einsatzgebiets differenziert wurden. Beim Ortsbezug lässt sich festhalten, dass drei der fünf betrachteten Verfahren streckengenau arbeiten, der Rest arbeitet positionsgenau. Das ist keine signifikante Mehrheit, so dass es nahe liegt, jeweils einen Vertreter der streckengenauen und einen der positionsgenauen Verfahren in die Untersuchungen mit einzuschließen. Anders bei der impliziten Störungsdefinition. Hier überwiegt die Verwendung des Geschwindigkeitsniveaus, die zu betrachtenden Verfahren sollten sich also auf diese Störungsdefinition konzentrieren. Ähnlich stellt es sich beim Einsatzgebiet dar, hier überwiegt der innerstädtische Bereich, sodass hier bei der Auswahl der Verfahren den innerstädtischen Verfahren und bei der Auswahl des zugrunde liegenden Verkehrsnetzes ebenso einem innerstädtischen Verkehrsnetz der Vorzug gegeben werden sollte.

4.2.1 Frequenzdomänenverfahren

Diesen Anforderungen stehen Einschränkungen bezüglich der Zugänglichkeit der Verfahren – wie in Abschnitt 3.7.2 bereits diskutiert – gegenüber. Innerhalb dieses Rahmens müssen nun geeignete Verfahren gefunden werden. Von den in Abschnitt 2.2 erwähnten Verfahren stand das Frequenzdomänenverfahren als eine Menge von MATLAB-Programmen im Quellcode zur

Verfügung. Mit ihm kann die Forderung nach einem positionsgenauen Verfahren, das innerstädtisch das Geschwindigkeitsniveau als implizite Störungsdefinition mit verwendet, erfüllt werden. Als Einschränkung kann hier genannt werden, dass dieses Verfahren als implizite Störungsdefinition eigentlich den Bereich zwischen zwei Phasen hoher Unruhe im Verkehrsablauf mit niedrigem Geschwindigkeitsniveau verwendet, als Schwerpunkt also die Unruherkennung beinhaltet. Das Geschwindigkeitsniveau wird jedoch als zusätzlicher Indikator für den innerstädtischen Bereich verwendet, es wird sich also anhand der Messergebnisse zeigen, ob dieses Verfahren im gewählten Anwendungsfall gute Ergebnisse erzielt.

Da sich das Verfahren, wie in Abschnitt 2.2.3.3 beschrieben, auf die fahrzeugseitige Erkennung von Störungsflanken konzentriert, musste das Verfahren um die empfängerseitige Datenverarbeitung der Zentrale ergänzt werden, indem die vom Störungsflanken der Fahrzeuge zentralseitig zu Störungen mit Beginn- und Endposition zusammengesetzt werden. Dazu werden fahrzeugseitig drei Zustände erkannt und als Meldungen mit der entsprechenden Position im Segment versendet:

- Störungseinfahrt
- Störungsausfahrt
- Innerhalb der Störung

Die ersten beiden bezeichnen die bereits bekannten Störungsflanken, die dritte ist zur Bestätigung und Aktualisierung von Störungsereignissen gedacht. Empfängt die Zentrale eine dieser Meldungen, überprüft die empfängerseitige Datenverarbeitung zunächst, ob für das betroffene Segment bereits eine Störung zusammengesetzt wurde. Ist dies der Fall, werden die Beginn- und Endpositionen verglichen und gegebenenfalls mit den empfangenen Daten aktualisiert. Wird eine Meldung „Innerhalb der Störung“ empfangen, erfolgt eine Überprüfung, ob die Position dieses Ereignisses außerhalb der zusammengesetzten Störung liegt. Im Positivfall wird entweder die Beginn- oder Endposition der Störung aktualisiert, je nachdem ob die Position der Meldung „Innerhalb der Störung“ vor der Beginn- oder nach der Endposition lag.

Wird hingegen eine Meldung für ein Segment empfangen, für das zentralseitig noch keine Störung zusammengesetzt wurde, muss geschätzt werden. Da zu diesem Zeitpunkt entweder die Information Störungseinfahrt, Störungsausfahrt oder „Innerhalb der Störung“ vorliegt, ergänzt die empfängerseitige Datenverarbeitung der Zentrale diese punktuellen Informationen durch Extrapolation an die Segmentgrenzen. Wurde also eine Störungseinfahrt empfangen, wird davon ausgegangen, dass dies der Beginn einer Störung ist, die sich bis zum Ende des Segments ausdehnt. Ähnlich wird im Fall einer Störungsausfahrt rückgeschlossen, dass dies das Ende einer Störung darstellt, die bis zum Segmentanfang zurückreicht, die Meldungen über Störungseinfahrt jedoch bei der Zentrale nicht oder noch nicht eingetroffen sind. Wurde hingegen eine Meldung „Innerhalb der Störung“ empfangen, wird eine punktuelle Störung erzeugt, deren Beginn gleich dem Ende gleich der Position der empfangenen Meldung entspricht. Diese geschätzten Störungsausdehnungen werden dann, wie bereits weiter oben beschrieben, verfeinert, wenn Meldungen weiterer Fahrzeuge für dieses Segment vorliegen. Zusammengefasst liegt zentralseitig damit eine netzweite Verkehrslage in Form von positionsgenauen Störungen vor.

4.2.2 Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren

Für das streckengenaue Verfahren stand kein Verfahren in integrierbarer Form zur Verfügung, da die genannten Verfahren proprietär und im Quellcode nicht zugänglich sind. Die meisten Verfahren haben jedoch im Kern einen gemeinsamen Nenner: die streckengenaue Sammlung von Durchschnittsgeschwindigkeiten – bei Taxi-FCD und SOTIS direkt, bei City-FCD indirekt über die Reisezeit. Aus diesem Grund wurde eine Variante der streckengenauen Verfahren mit dem Geschwindigkeitsniveau als implizite Störungsdefinition selbst entwickelt, die die Forderung nach dem streckengenauen Verfahren erfüllen kann. Der Vorteil dieser Herangehensweise ist die Zugänglichkeit zu den Verfahrensdetails bei gleichzeitiger prinzipieller Übereinstimmung mit den Verfahren, die das Geschwindigkeitsniveau als implizite Störungsdefinition verwenden. Als Einschränkung muss jedoch genannt werden, dass die Optimierungen in den einzelnen Verfahren des Abschnitts 2.2 nicht mit berücksichtigt werden, was aber für die Validierung der Methodik wie eingangs erwähnt unkritisch ist. Das Verfahren wird Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren genannt und im Folgenden ähnlich dem Abschnitt 2.2 vorgestellt.

4.2.2.1 Verfahrensbeschreibung

Die Zielanwendung des Verfahrens ist die Rekonstruktion der Verkehrslage in Form eines netzweiten Überblicks über die aktuellen Durchschnittsgeschwindigkeiten pro Segment. Um dies zu erreichen, berechnet jedes partizipierende Fahrzeug nach Durchfahren eines Segments anhand der Länge des Segments und der benötigten Zeit die Durchschnittsgeschwindigkeit und versendet diese an die Zentrale.

Die Zentrale sammelt pro Zeitschritt und pro Segment zunächst alle eingehenden Durchschnittsgeschwindigkeiten, bildet im nächsten Schritt pro Segment den Durchschnitt aller empfangenen Meldungen der Fahrzeuge des gleichen Segments und speichert pro Segment eine Historie konfigurierbarer Länge der entstehenden Segmentdurchschnittsgeschwindigkeiten auf. Um im städtischen Umfeld unvermeidbare, durch Lichtsignalanlagen verursachte Schwankungen der Durchschnittsgeschwindigkeit in zeitlicher Hinsicht zu glätten, wird für die aktuelle Durchschnittsgeschwindigkeit eines Segments aus der zugehörigen Historie ein gleitender Mittelwert für ein Zeitfenster berechnet. Um realistische Umlaufzeiten mit einzuschließen, wurde als Zeitfenster 120 Sekunden gewählt.

Dieses Verfahren ist aufgrund seiner Einfachheit für jedes in Segmente unterteilte Verkehrsnetz geeignet. Für Stadtnetze ist es aufgrund der kürzeren Meldeintervalle wegen der typischerweise ebenso kürzeren Segmente im Verkehrsnetz besser geeignet.

Die fahrzeugseitige Datenverarbeitung beschränkt sich auf das Erkennen des Segmentendes, was das Vorhandensein einer digitalen Karte im Fahrzeug erforderlich macht, einer Zeitmessung und das Berechnen der Durchschnittsgeschwindigkeit. Zentralseitig entsteht wegen der Menge der zu berechnenden Daten jedoch der größere Aufwand, als Schwerpunkt wird daher die empfängerseitige Datenverarbeitung festgelegt.

Wie bisher ausgeführt, ist das Verfahren für eine zentrale Kommunikationsstruktur ausgelegt. Übernimmt man jedoch von SOTIS den Grundgedanken der lokalen Verkehrslage, kann jedes Fahrzeug selbst die Rolle der Zentrale übernehmen und seine Datenbasis permanent mit den Meldungen der umgebenden Fahrzeuge aktualisieren. Damit pflegt jedes Fahrzeug seine eigene

lokale Verkehrslage, die aus dem Durchschnittsgeschwindigkeiten derjenigen Fahrzeuge besteht, die innerhalb der Übertragungreichweite der verwendeten Übertragungstechnologie (wie etwa WLAN) liegen. In dieser Verfahrensausprägung entspricht das Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren im Grundgedanken SOTIS, womit implizit ein weiteres Verfahren durch die Verwendung des Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahrens mit berücksichtigt werden kann. Für weitere Details zum Austausch fahrzeugseitiger Datenbasen und zur Erzeugung lokaler Verkehrslagen sei auf das Verfahren SOTIS im Abschnitt 2.2.3.4 verwiesen.

4.2.2.2 Profil

<i>Zielanwendung</i>	Rekonstruktion der Verkehrslage
<i>Einsatzgebiet</i>	Stadt, (Autobahn)
<i>Schwerpunkt</i>	Empfängerseitige Datenverarbeitung
<i>Grundgedanke</i>	1) Erzeugen eines netzweiten Verkehrslagebildes in Form von segmentbezogenen, gleitenden Durchschnittsgeschwindigkeiten 2) Erzeugen einer lokalen Verkehrslage in Form segmentbezogener Durchschnittsgeschwindigkeiten unter Verwendung reiner Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation
<i>Kommunikation</i>	1) zentral (up-link: Punkt-zu-Punkt, down-link: -) 2) dezentral (up-link: broadcast, down-link: broadcast)
<i>Datenbasis</i>	Segmentlänge des Verkehrsnetzes, Segmentreisezeit
<i>DV Fahrzeug</i>	Berechnung der Durchschnittsgeschwindigkeit auf dem Segment
<i>Zwischengröße up-link</i>	Durchschnittsgeschwindigkeit auf dem Segment
<i>Ortsbezug ZG up-link</i>	Strecke
<i>DV Empfänger</i>	Aggregation aller empfangenen Durchschnittsgeschwindigkeiten pro Segment pro Zeitpunkt, Speichern der Durchschnittsgeschwindigkeit pro Segment in Historie, Bildung gleitender Mittelwert der letzten 120s pro Segment
<i>Zwischengröße down-link</i>	1) - 2) Durchschnittsgeschwindigkeit auf dem Segment

Tabelle 10: Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren

4.2.3 Kommunikationsstruktur

Alle in Abschnitt 2.2 genannten Verfahren haben ihr eigenes Kommunikationsverhalten fest definiert. Die Kommunikationsvariante hat jedoch starken Einfluss auf die entstehenden Kosten, etwa bei zentraler Kommunikation durch die versendeten SMS-Nachrichten. Soll nun untersucht werden, ob Kosten durch die Verwendung dezentraler Kommunikation reduziert werden können, etwa durch Verwendung von WLAN anstelle von SMS, ist dies mit dem verkehrstelematischen Prüfstand durchaus möglich. Dafür müssen jedoch die Algorithmen in den Verfahren aller Voraussicht nach angepasst werden, was ein Vorliegen im Quellcode zwingend erforderlich macht. Dies ist ein weiterer, entscheidender Grund, warum das Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren entwickelt wurde. Es kann dadurch sowohl unter Verwendung von zentraler als auch von dezentraler Kommunikation untersucht werden.

4.3 Verkehrsnetzdaten

Als Voraussetzung für realitätsnahe Untersuchungen werden Verkehrsnetzdaten benötigt, mit denen nicht-triviale Untersuchungen unter realitätsnahen verkehrlichen Randbedingungen mit Schwerpunkt im innerstädtischen Bereich durchgeführt werden können. Mit dem in [MAT07] entwickelten und für diese Arbeit dankenswerterweise von der Autorin zur Verfügung gestellten Verkehrsnetz stand ein großes, innerstädtisches Verkehrsnetz bereit, das ebenso städtischen Verkehr als auch Verkehr auf Autobahnen und Schnellstraßen ermöglicht. „Das Untersuchungsgebiet umfasst [dabei] das Hauptstraßennetz der Stadt Hannover. Ergänzt wird es durch Strecken direkt angrenzender Gemeinden, so dass ein zusammenhängendes Netz resultiert, das in etwa durch das umliegende Autobahn- bzw. Schnellstraßennetz begrenzt wird“⁵¹. Das Netz besteht aus 3460 Kanten, einer Gesamtstreckenlänge von 1256km, bzw. 1882km Fahrstreifenlänge und 261 Knotenpunkten mit Lichtsignalanlagen und ist in Abbildung 26 dargestellt.

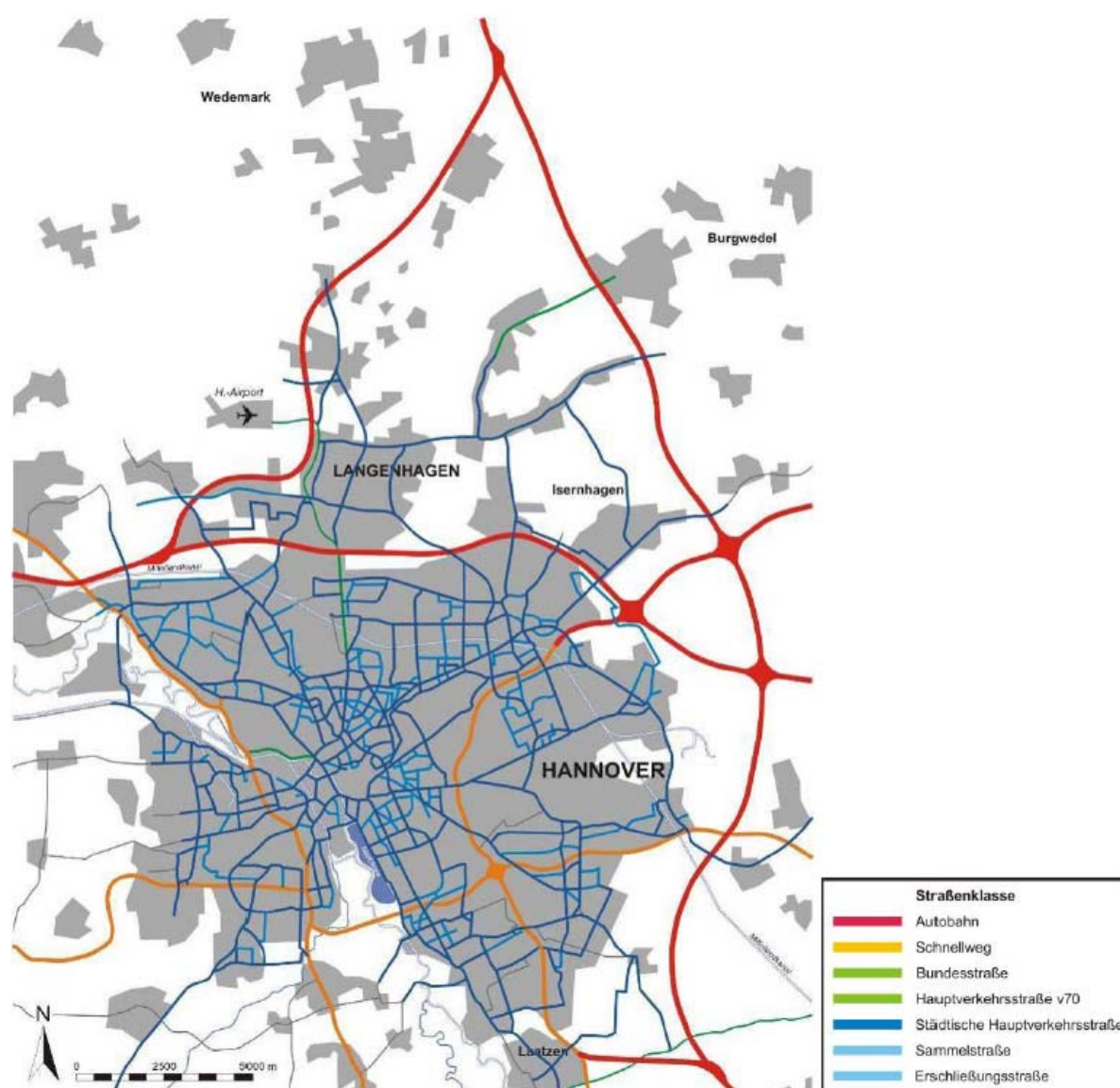


Abbildung 26: Modelliertes Verkehrsnetz von Hannover⁵²

⁵¹ [MAT07], S. 100

⁵² [MAT07], S. 100

Aufgrund der Größe des Verkehrsnetzes und des damit verbundenen immensen Rechenaufwands mussten bei der Abbildungsgenauigkeit Einschränkungen vorgenommen werden: es wurden nicht alle untergeordneten Straßen in das Verkehrsnetz mit aufgenommen und es wurde auf den Individualverkehr fokussiert, der öffentliche Verkehr wurde nicht mit eingebunden⁵³. Betrachtet man die getroffenen Einschränkungen, so sind sie für die Zielanwendung Rekonstruktion der Verkehrslage unkritisch, sofern keine Floating Car Data Systeme für Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs untersucht werden sollen. Da in Abschnitt 2.2 keines der genannten Verfahren in diese Kategorie fällt, ist die Einschränkung auf Individualverkehr für den verkehrstelematischen Prüfstand nicht relevant. Die Größe und Zusammensetzung des Netzes umfasst alle geforderten Einsatzgebiete und ist zudem von signifikanter Länge und Komplexität. Das Fehlen untergeordneter Straßen kann daher auch als vernachlässigbar eingestuft werden.

Die Verkehrsnachfrage wurde über 303 Quellen und Ziele modelliert und mit Hilfe von realen Daten kalibriert. Um die Schwankungen im täglichen Verlauf realitätsnah zu modellieren, wurden Verkehrszählungen an verschiedenen, über Hannover verteilten Stellen aus den Jahren 2000 bis 2005 betrachtet und in Verkehrsnachfragematrizen überführt⁵⁴. „Diese Vorgehensweise vermag natürlich nicht, spezifische Schwankungen auf einzelnen Nachfragebeziehungen differenziert nachzubilden. Dem Anspruch, eine realistische Nachfrage zu generieren, die die Verteilung starker und schwächer ausgeprägter Regionen im Netz wiedergibt, wird sie aber gerecht“⁵⁵. Die resultierende Verteilung der Verkehrsnachfrage über den Tag ist aus Abbildung 27 ersichtlich und ist in den Verkehrsnachfragematrizen im 15-minütigen Raster gemäß dieser Verteilung berücksichtigt.

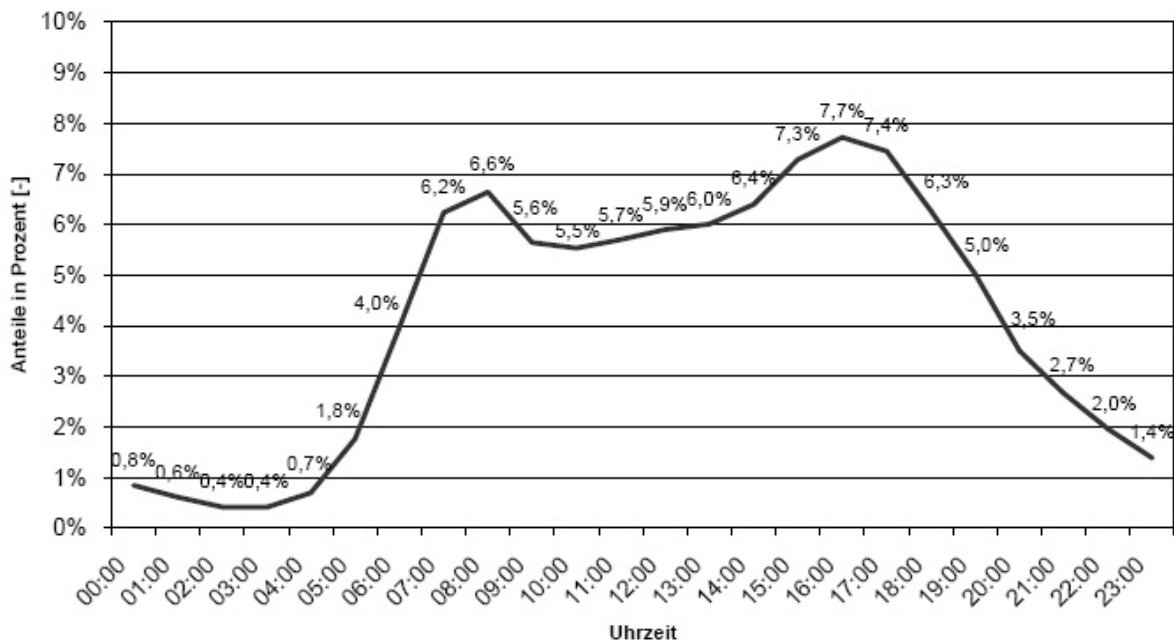


Abbildung 27: Prozentuale Aufteilung der 24h-Verkehrsnachfrage über den Tag⁵⁶

⁵³ [MAT07], S. 101

⁵⁴ [MAT07], S. 102

⁵⁵ [MAT07], S. 102f

⁵⁶ [MAT07], S. 103

Darüber hinaus wurden reale Verkehrsstärkezahlungen an 635 über das Gesamtnetz verteilten Kanten unterschiedlicher Straßenklassen in stundenfeiner Auflösung für den Zeitraum von 6:00 bis 10:00 (2540 Kalibrierungswerte) aus den Jahren 1998 bis 2005 mit den übereinstimmenden Stellen im modellierten Verkehrsnetz verglichen, um eine Aussage über die Anpassungsgüte des Modells zu erhalten. Die Autorin kommt zu dem Schluss, dass zwar keine hervorragende Anpassung erreicht werden konnte, aber diese durchaus für die Klassifizierung als realistisches städtisches Netz ausreicht⁵⁷. Darüber hinaus wurde in der Verkehrsnachfrage sowohl Schwerverkehr als auch Verkehr der Fahrzeugart „Pkw“ berücksichtigt.

In diesem Netz wurden acht Straßenklassen definiert und für jede die entsprechende Geschwindigkeitsbeschränkung festgelegt. Die Straßenklassen und die zugehörige maximal zulässige Höchstgeschwindigkeit sind in Tabelle 11 aufgelistet.

Straßenklasse	Zulässige Geschwindigkeit
Autobahn	120
Bundesstrasse	100
Schnellweg	80
City Ring	70
Ein-/Ausfahrtrampe	60
Hauptverkehrsstrasse	50
Sammelstrasse	30
Erschließungsstrasse	30

Tabelle 11: Zulässige Geschwindigkeit pro Straßenklasse

Damit genügt dieses Verkehrsnetz den Anforderungen des verkehrstelematischen Prüfstands und kann zusammen mit den Verkehrsnachfragenmatrizen unverändert in die statischen und dynamischen Verkehrsnetzdaten übernommen werden.

4.4 Konfigurationen

Wie die zu untersuchenden Verfahren in den einzelnen Ausprägungen für die definierte Zielanwendung zusammen mit dem Verkehrsnetz, den Verkehrsnachfragenmatrizen und anderen Parametern in den unterschiedlichen Kombinationsebenen zu Szenarien verschalten wurden, ist Gegenstand des vorliegenden Abschnitts.

4.4.1 Messaufbauten

Für alle Szenarien wurde als statische Verkehrsnetzdaten das in Abschnitt 4.3 beschriebene Verkehrsnetz von Hannover verwendet. Es bietet die benötigte Komplexität, Auflösung und Realitätsnähe für alle benötigten Untersuchungen und bildet somit die statischen Verkehrsnetzdaten. Welche dynamischen Verkehrsnetzdaten sowie weitere übergeordnete Systemparameter zum Einsatz kamen und welche Datenquellen daraus erzeugt wurden, wird in den folgenden Abschnitten 4.4.1.1 und 4.4.1.2 erläutert. Welche Metriken zum Vermessen der

⁵⁷ [MAT07], S. 104

darin definierten Untersuchungen festgelegt wurden, wird schließlich in Abschnitt 4.4.1.3 dargelegt.

4.4.1.1 Hauptuntersuchung

In der Hauptuntersuchung wurden die in Abschnitt 4.2 festgelegten Verfahren – das Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren und das Frequenzdomänenverfahren – unter normalen Betriebsbedingungen untersucht. Um das Verhalten der Verfahren in unterschiedlichen Verkehrssituationen betrachten zu können, wurden aus den zur Verfügung stehenden Verkehrsnachfragematrizen drei jeweils einstündige Bereiche extrahiert. Diese wurden aus dem Zeitfenster von 6:00 Uhr bis 10:00 Uhr gewählt, das die Spitze des morgendlichen Berufsverkehrs nach Abbildung 27 beinhaltet. Es entstanden die folgenden Verkehrsnachfragematrizen (in 15-minütigem Raster), die dem verkehrstelematischen Prüfstand als dynamische Verkehrsnetzdaten bereitgestellt wurden:

- 6:30 Uhr – 7:30 Uhr: gekennzeichnet durch stark steigende Nachfrage, aber kaum verkehrliche Vorbelastung des Netzes aus der vorausgehenden Nacht, und Beginn der Sättigung auf das morgendliche Spitzenniveau gegen Ende des Zeitfensters
- 7:30 Uhr – 8:30 Uhr: beinhaltet den Bereich vor und nach der morgendlichen Spitzenbelastung, die Vorbelastung des Netzes ist bereits signifikant
- 8:30 Uhr – 9:30 Uhr: die Zeit nach der morgendlichen Spitze, das Netz ist von der Spitzenperiode vorbelastet, die Belastung ist jedoch abklingend

Mit diesen Verkehrsnachfragematrizen wurden durch AIMSUN die entsprechenden Fahrzeugdaten erzeugt und im entkoppelten Betrieb zusammen mit den statischen und dynamischen Verkehrsnetzdaten als Datenquelle in der Datenbank hinterlegt. Vor Aufzeichnung dieser wurde für jede Verkehrsnachfragematrix das Netz in AIMSUN eine halbe Stunde mit der Verkehrsnachfrage vorgewärmt, die für den Beginn des jeweiligen Zeitfensters in der Verkehrsnachfragematrix hinterlegt war, um ein realistisch mit Fahrzeugen vorgefülltes Verkehrsnetz für die Aufzeichnung der Datenquelle zu erzeugen.

Beim Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren im zentralen Kommunikationsfall wurden Messreihen für alle drei Verkehrsnachfragen aufgezeichnet, für den dezentralen Fall die ersten beiden Verkehrsnachfragen und für das Frequenzdomänenverfahren aufgrund seines hohen Bedarfs an Rechenleistung nur die erste Verkehrsnachfrage gemäß obenstehender Liste.

Als Zufallsstartzahl kam dabei die 30432 zum Einsatz, als Abtastintervall wurde eine Sekunde gewählt und die Simulationsdauer wurde mit Ausnahme des dezentralen Kommunikationsfalles auf eine Stunde festgelegt. Da die Simulation der dezentralen Szenarien aufgrund des datenintensiven Konzepts der lokalen Verkehrslagen für die Simulationsdauer von einer Stunde an die Grenzen des verfügbaren Hauptspeichers der Simulationsserver stieß, wurde die Simulationsdauer im dezentralen Fall auf 30 Minuten beschränkt.

4.4.1.2 Sensitivitätsanalysen

Da der verkehrstelematische Prüfstand im Anwendungsfall Verkehrsinformation mit Floating Car Data mit AIMSUN als Fahrzeugsteuerung verwendet wird, ist von besonderem Interesse,

den Einfluss von Simulationsgrößen auf das Ergebnis zu kennen, um eine Aussage über die Zuverlässigkeit zu bekommen. Neben den Simulationsgrößen ist es aber auch wichtig zu wissen, wie stark reale Eingangsgrößen, insbesondere die Verkehrsnachfrage und die Untersuchungsdauer, das Ergebnis beeinflussen. Dies soll durch die im Folgenden festgelegten Sensitivitätsanalysen geschehen. Soweit möglich, wurden dabei die jeweils anderen Einflussgrößen konstant gehalten und nur die untersuchte Größe variiert, welche dabei verwendet wurden, ist in den einzelnen Abschnitten genannt.

4.4.1.2.1 Simulationsgrößen

Die in Abschnitt 3.3.2 vorgestellte Komponentenerzeugung erfolgt bei Verwendung von AIMSUN auf Fahrzeugsteuerungsseite durch zufällige Erzeugung von Fahrzeugen in den im Verkehrsnetz vorhandenen Quellen gemäß der aktuellen Verkehrsnachfrage. Informationstechnisch geschieht dies durch Verwendung eines Pseudo-Zufallszahlengenerators. Dieser verwendet eine Zufallsstartzahl, mit Hilfe der er nach mathematischen Verfahren eine zufällige Zahlenfolge berechnet. Diese Zahlenfolge hat dann zwar den Anschein einer zufälligen Verteilung, die mathematischen Verfahren arbeiten jedoch deterministisch, bei gleicher Zufallsstartzahl entsteht also immer die zwar zufällige, aber gleiche Zahlenfolge. Unterschiedliche, zufällige Zahlenfolgen können durch die Verwendung verschiedener Zufallsstartzahlen erreicht werden. Verkehrlich gesehen erzeugt jede Zufallsstartzahl eine andere verkehrliche Realität, die zwar den Vorgaben der aktuellen Verkehrsnachfragematrix entspricht, in ihrer Verteilung jedoch unterschiedlich ausfallen kann. Diese Zufallsstartzahl ist in AIMSUN bei Simulationsstart anzugeben und wird vom verkehrstelematischen Prüfstand nach Erzeugung der Datenquelle mit in der Datenbank hinterlegt.

Um den Einfluss dieser Zufallsstartzahl auf die Rekonstruktion der Verkehrslage zu untersuchen, wurden die gleichen Messreihen für drei zufällig ausgewählte Zufallsstartzahlen durchgeführt: 6793, 16844 und 30432. Da jede Zufallsstartzahl eine eigene Verteilung der Fahrzeugerzeugung in Abhängigkeit der vorgegebenen Verkehrsnachfrage darstellt, ist ein Einfluss der Verkehrsnachfrage auf die Sensitivität des Ergebnisses des verkehrstelematischen Systems in Abhängigkeit der Zufallsstartzahl möglich. Daher wurden aus den vorhandenen Verkehrsnachfragematrizen zwei 15-minütige Verkehrsnachfragematrizen extrahiert und nach jeweils halbstündiger Vorwärmzeit von AIMSUN im entkoppelten Betrieb in Datenquellen geschrieben:

- 6:30 Uhr - 6:45 Uhr: kennzeichnet ein Zeitfenster geringer Verkehrsnachfrage
- 8:30 Uhr - 8:45 Uhr: entspricht dem Bereich hoher Verkehrsnachfrage direkt angrenzend an die morgendlichen Spitze

Mit den resultierenden Kombinationen aus den drei Zufallsstartzahlen und den beiden Verkehrsnachfragematrizen wurde dann das Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren im zentralen Kommunikationsszenario für die **Sensitivitätsanalyse Zufallsstartzahl** untersucht. Alle anderen Konfigurationen entsprechen der der Hauptuntersuchung.

Die zweite Simulationsgröße betrifft das Abtastintervall. Dazu muss man zwischen dem Zeitintervall, das in AIMSUN als Zeitschritt vorgegeben wurde und dem Abtastintervall unterscheiden, das die von AIMSUN gelieferten Daten zu konfigurierbaren Zeitpunkten abtastet.

Der in AIMSUN verwendete Zeitschritt war für alle Untersuchungen eine Sekunde, sodass für den entkoppelten Betrieb sekundenfeine Fahrzeugdaten zur Aufzeichnung der Datenquelle bereitstanden. Zur Untersuchung, ob aus Gründen der Performanzsteigerung oder der Reduktion des Datenaufkommens auch eine weniger feine zeitliche Auflösung ausreichen würde, kann das Abtastintervall verwendet werden. Dieses muss immer größer oder gleich dem Zeitschritt sein und wurde für die **Sensitivitätsanalyse Abtastintervall** auf 1, 2 und 5 Sekunden festgelegt. Für alle anderen Untersuchungen wurde das Abtastintervall auf einer Sekunde belassen, damit kein Informationsverlust gegenüber den von AIMSUN erzeugten Daten entstand. Um ähnlich der Sensitivitätsanalyse Zufallsstartzahl Einflüsse der Verkehrsnachfrage mit berücksichtigen zu können, wurden die für die Sensitivitätsanalyse Zufallsstartzahl extrahierten 15-minütigen Verkehrsnachfragematrizen verwendet. Im entkoppelten Betrieb sind damit die Datenquellen – mit der jeweils halbstündigen Vorwärmzeit des Verkehrsnetzes – unter Verwendung der Abtastintervalle 2 und 5 Sekunden aufgezeichnet worden. Die Datenquellen der Sensitivitätsanalyse Zufallsstartzahl wurde mit 1 Sekunde Abtastintervall aufgezeichnet, sodass diese auch hier verwendet werden kann. Auf Seite des verkehrstelematischen Prüfstands standen somit Datenquellen mit einer zeitlichen Auflösung von 1, 2 und 5 Sekunden für die Untersuchung zur Verfügung. Alle Kombinationen der drei Abtastintervalle und der beiden Verkehrsnachfragematrizen wurden daraufhin mit dem Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren im zentralen Kommunikationsszenario in der Sensitivitätsanalyse Abtastintervall untersucht. Um einen Einfluss der Zufallsstartzahl auszuschließen, wurden diese Untersuchungen mit der gleichen Zufallsstartzahl 30432 durchgeführt. Alle anderen Konfigurationen entsprechen der der Hauptuntersuchung.

4.4.1.2.2 Reale Eingangsgrößen

Als schon mehrfach erwähnte Einflussgröße auf das Ergebnis des verkehrstelematischen Systems ist die Verkehrsnachfrage zu nennen. Schwankungen im Ergebnis aufgrund unterschiedlicher Verkehrsnachfragen charakterisieren dabei jedoch weniger die Zuverlässigkeit der Methodik als vielmehr die Fähigkeit des verwendeten verkehrstelematischen Systems, unabhängig von verschiedenen verkehrlichen Realitäten ein konstantes Ergebnis zu liefern. Wie stark das Ergebnis von der es erzeugenden Verkehrsnachfrage abhängt, ist Gegenstand der Untersuchung in der **Sensitivitätsanalyse Verkehrsnachfrage**. Für diese Analyse müssen keine weiteren Verkehrsnachfragematrizen extrahiert oder Datenquellen aufgezeichnet werden, die Daten liegen bereits durch die Hauptuntersuchung vor. Alle anderen Konfigurationen entsprechen der der Hauptuntersuchung.

Die zweite reale Eingangsgröße ist durch die Simulationsdauer gegeben. Diese erscheint auf den ersten Blick als Simulationsgröße, betrachtet man die Simulationsdauer jedoch als Zeitfenster, innerhalb dessen das Ergebnis eines verkehrstelematischen Systems gemessen wird, hat dies durchaus den Charakter einer – zumindest für die Zwecke der Messung – realen Einflussgröße. Damit kann die Simulationsdauer sowohl als Simulationsgröße als auch reale Eingangsgröße betrachtet werden, die Klassifizierung als reale Eingangsgröße ist willkürlich und nicht von weiterer Bedeutung, da sie auf die Analyse selbst keinen Einfluss hat. Für die **Sensitivitätsanalyse Simulationsdauer** war es notwendig, von den sich nach Abbildung 27 realitätsnah über den Tag verändernden Verkehrsnachfragen abzuweichen. Da der Einfluss der Simulationsdauer untersucht werden soll, ist es notwendig, die Verkehrsnachfrage innerhalb dieses Zeitfensters konstant zu halten, um den Einfluss der Veränderung der Verkehrsnachfrage

ausschließen zu können. Dafür wurde eine zweistündige Verkehrsnachfragematrix von 6:30 Uhr bis 8:30 Uhr aus den vorhandenen Verkehrsnachfragematrizen derart extrahiert, dass die zu Beginn des Zeitfensters definierte Verkehrsnachfrage über die gesamten zwei Stunden konstant beibehalten wurde. Im entkoppelten Betrieb wurde diese Verkehrsnachfrage dann von AIMSUN für 15, 30, 60 und 120 Minuten simuliert und in vier entsprechende Datenquellen geschrieben. Als Zufallsstartzahl wurde 30432 und als Abtastintervall eine Sekunde verwendet. Damit wurde dann das Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren im zentralen Kommunikationsszenario im verkehrstelematischen Prüfstand untersucht. Alle anderen Konfigurationen entsprechen der der Hauptuntersuchung.

4.4.1.3 Metriken

Für die festgelegten Messaufbauten wurde eine Menge von Metriken definiert, deren Ziel es war, sowohl die technische, als auch die wirtschaftliche Charakteristik des verkehrstelematischen Systems zu vermessen, um mit ihnen ein Profil des Systems zu erstellen. Während der Messdurchläufe werden, wie in Abschnitt 3.2.4 bereits erläutert, die technischen Kenngrößen in ihrer Endausprägung aufgezeichnet, für die wirtschaftliche Charakteristik werden jedoch nicht die endgültigen Kosten, sondern die entstehenden Kostenmengen aufgezeichnet. Dies ermöglicht im Nachgang mehrere Analysen mit verschiedenen Kostenstrukturen, basierend auf diesen Kostenmengen durchzuführen, ohne die entsprechenden Szenarien noch einmal neu vermessen zu müssen.

In [LAM05] wurde für Floating Car Data Systeme das „Cost Quality Profile“ vorgestellt, das zum einen für den Anwendungsfall als theoretischer Rahmen verwendet wurde und zum anderen als die die Metriken ansteuernde Komponente von der Profil-Komponente abgeleitet und umgesetzt wurde (siehe Abschnitt 3.2.4). Es definiert sowohl für die technische als auch die wirtschaftliche Charakteristik Metriken, die im Folgenden vorgestellt werden.

4.4.1.3.1 Technische Charakteristik

Diese Charakteristik stellt die Gesamtheit der erfassten Kenngrößen in technischer Hinsicht dar. Die zentrale Größe des Ergebnisses in technischer Hinsicht ist die *Qualität* der in der rekonstruierten Verkehrslage enthaltenen Verkehrsinformationen. Sie ist das Bindeglied zwischen der technischen und wirtschaftlichen Seite, da eine vorgegebene Qualität eines Verfahrens nur unter Aufwand der entsprechenden Kosten erreichbar ist. Sie bildet die Vermessung der Rekonstruktion der Verkehrslage, unabhängig davon, wo diese berechnet wird. Im Fall von zentraler Kommunikation bedeutet dies die Vermessung der empfängerseitigen Datenverarbeitung bei der Zentrale, im Fall dezentraler Kommunikation wird jede einzelne lokale Verkehrslage in jedem Fahrzeug vermessen und statistisch gemittelt (Mittelwert, Maximum, Minimum) aufgezeichnet.

In der Literatur finden sich wenige Angaben zur Bewertung der **Qualität** von Verkehrsinformationen. Ein aktueller, kombinierter Ansatz ist [BOG03] zu entnehmen und vereint die räumliche und die zeitliche Genauigkeit von Verkehrsinformationen in einer Kennzahl, der *Erkennungsrate*. Die zweite Kennzahl, die die gleichen Eingangsgrößen verwendet, ist die *Falschalarmrate*. Beide verwendeten Größen sind Flächen einer räumlich-zeitlichen Ausdehnung eines tatsächlichen Verkehrereignisses (z.B. Stau) E , einer vom

verkehrstelematischen System rekonstruierten Verkehrsinformation A und der Schnittmenge der beiden D . Grafisch veranschaulicht sind diese Kennzahlen in Abbildung 28. Wie diese räumlich-zeitlichen Ausdehnungen für die Verfahren des Anwendungsfalls berechnet werden, wird in Abschnitt 4.4.1.4 ausgeführt.

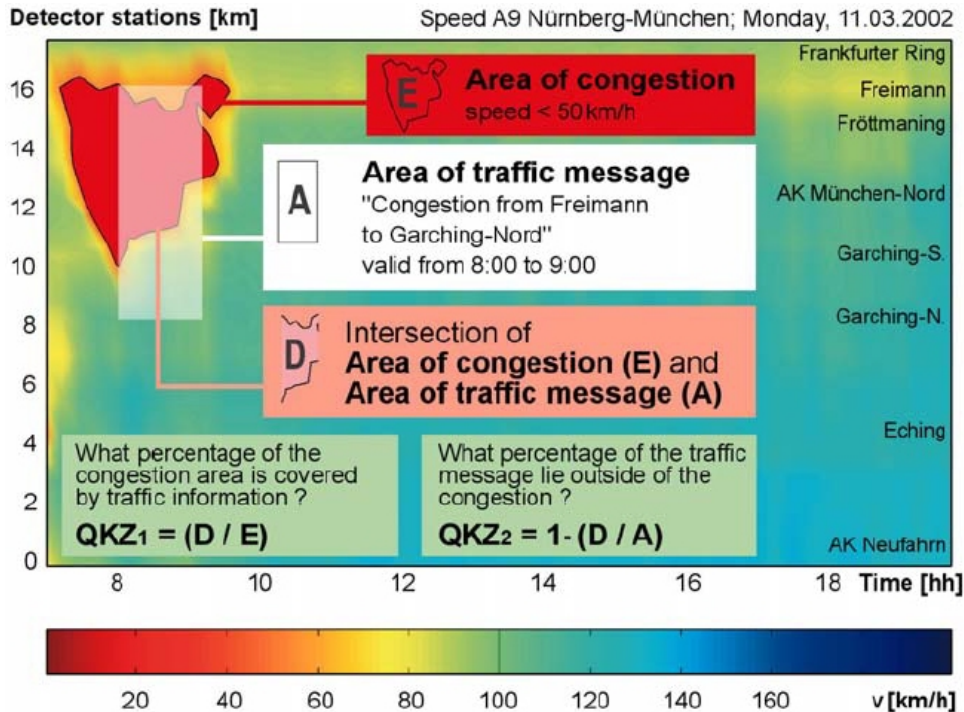


Abbildung 28: Qualitätsindizes nach räumlich-zeitlichen Flächen [BOG03]

Die darin verwendeten Kennzahlen berechnen sich wie folgt:

- **Erkennungsrate [%]**

$$ER = (D/E)$$

Sie entspricht dem Prozentsatz der Fläche der Schnittmenge D des tatsächlichen Verkehrereignisses E mit der Fläche der rekonstruierten Verkehrsinformation A , bezogen auf die Fläche des tatsächlichen Verkehrereignisses E . Sie sagt aus, wie viel Fläche des tatsächlichen Verkehrereignisses durch die Verkehrsinformation abgedeckt wird und damit mit ihm übereinstimmt, also korrekt rekonstruiert wurde.

- **Falschalarmrate [%]**

$$FAR = \frac{A - D}{A} = 1 - \frac{D}{A}$$

Diese gibt den Prozentsatz der Fläche der rekonstruierten Verkehrsinformation außerhalb des tatsächlichen Verkehrereignisses – bzw. der Schnittmenge D der beiden – $(A - D)$, bezogen auf die Fläche der Verkehrsinformation A selbst an. An ihr kann man ablesen, wie viel Fläche der Verkehrsinformation außerhalb des realen Stauereignisses liegt und somit ein fehlerhaft rekonstruiertes Verkehrereignis darstellt.

Da die Qualitätskennzahlen räumliche und zeitliche Ungenauigkeit durch die Flächenbildung völlig gleich behandeln, kann anhand dieser Kennzahlen keine Unterscheidung nach zeitlicher und räumlicher Genauigkeit vorgenommen werden. Ob ein verkehrstelematisches System in zeitlicher Hinsicht oder in räumlicher Hinsicht genau arbeitet, ist jedoch sehr wohl von Interesse, da im ersten Fall an der Verarbeitungs- und Übertragungsgeschwindigkeit der gesamten beteiligten verkehrstelematischen Kette optimiert werden muss und im zweiten an der Fähigkeit des zugrunde liegenden Verfahrens, die Verkehrslage ortsgenau aufzulösen. Aus diesem Grund wurde der Ansatz von [BOG03] erweitert. Es wurden als ergänzende Beiwerte die *räumliche Genauigkeit* und die *zeitliche Genauigkeit* als Kenngrößen der technischen Charakteristik ermittelt. Sie ergeben sich jeweils als eindimensionale Betrachtung der Zeit-, bzw. der räumlichen Achse der Verkehrsinformation und des Verkehrsereignisses. Bei der zeitlichen Genauigkeit wurde dabei die räumliche Korrektheit völlig außer Acht gelassen und nur die Übereinstimmung in zeitlicher Hinsicht betrachtet. Die ignorierte räumliche Korrektheit wurde dann in der räumlichen Genauigkeit – hier jedoch wieder unter Vernachlässigung der zeitlichen Dimension – berechnet. Beide Kennzahlen dürfen damit nicht getrennt voneinander betrachtet werden, sondern nur zusammen.

Die genannten Kennzahlen berechnen sich wie folgt:

- **Zeitliche Genauigkeit [%]**

$$ZG = \frac{SZ}{VZ}$$

Sie berechnet sich aus der Schnittmenge der Zeitpunkte SZ , in denen sowohl das tatsächliche Verkehrsgeschehen als auch die rekonstruierte Verkehrsinformation aufgetreten sind, bezogen auf die Vereinigungsmenge der Zeitpunkte VZ , in denen entweder das tatsächliche Verkehrsgeschehen oder die rekonstruierte Verkehrsinformation aufgetreten ist. Sie trifft eine Aussage darüber, wie genau das verkehrstelematische System in der Lage ist, die Verkehrslage zeitlich zu rekonstruieren.

- **Räumliche Genauigkeit [%]**

$$RG = \frac{SR}{VR}$$

Diese ergibt sich ähnlich der zeitlichen Genauigkeit aus dem Prozentsatz der Schnittmenge der räumlichen Positionen SR , an denen sowohl das tatsächliche Verkehrsgeschehen als auch die rekonstruierte Verkehrsinformation aufgetreten sind, bezogen auf die Vereinigungsmenge der räumlichen Positionen VR , an denen entweder das tatsächliche Verkehrsgeschehen oder die rekonstruierte Verkehrsinformation aufgetreten ist. Sie gibt Auskunft über das Vermögen des Verfahrens, die Verkehrslage räumlich genau aufzulösen.

Mit diesen vier Kennzahlen zusammen wurde die Qualität der Rekonstruktion der Verkehrslage vermessen. Zur besseren Veranschaulichung der Kriterien und ihres Zusammenhangs sollen folgende Beispiele dienen, die einer im Rahmen dieser Arbeit betreuten Veröffentlichung

entnommen sind [JIN05]. Auf der x-Achse ist jeweils die Zeit, auf der y-Achse jeweils die Position aufgetragen. Als tatsächliches Verkehrereignis ist ein Stau genannt und in rot dargestellt, als Verkehrsinformation dementsprechend eine Staumeldung und schwarz gekennzeichnet.

- **Beispiel 1: ER = 1; FAR = 0; ZG = 1; RG = 1**

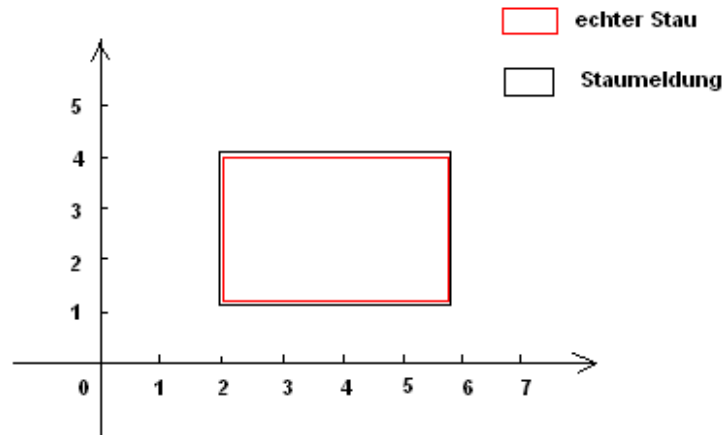


Abbildung 29: Qualitätskennzahlen Beispiel 1: tatsächliches Verkehrereignis und rekonstruierte Verkehrsinformation stimmen überein

- **Beispiel 2: ER = 0; FAR = 1; ZG = 1; RG = 0**

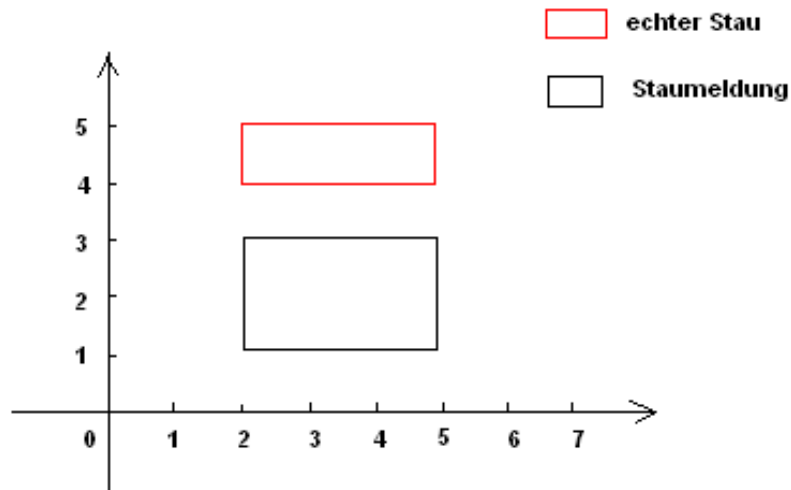


Abbildung 30: Qualitätskennzahlen Beispiel 2: tatsächliches Verkehrereignis und rekonstruierte Verkehrsinformation stimmen in zeitlicher Hinsicht überein

- **Beispiel 3: ER = 1; FAR = 2/3; ZG = 1/3; RG = 1**

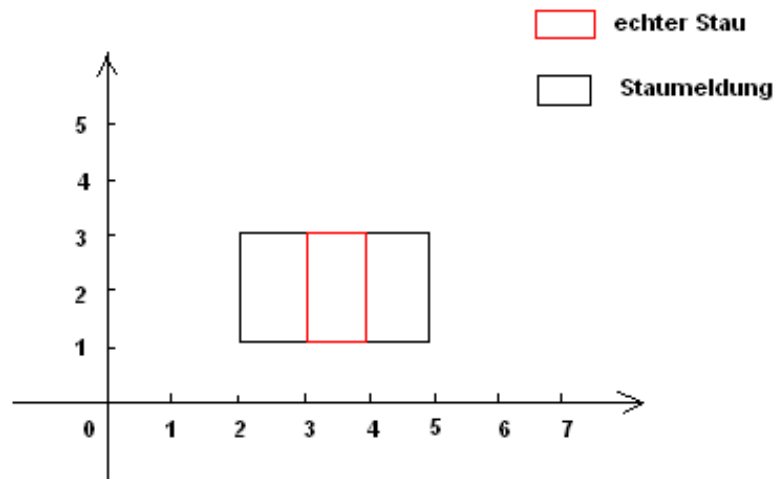


Abbildung 31: Qualitätskennzahlen Beispiel 3: tatsächliches Verkehrsereignis liegt vollständig innerhalb der rekonstruierten Verkehrsinformation

- **Beispiel 4: ER = 0; FAR = 1; ZG = 0; RG = 0**

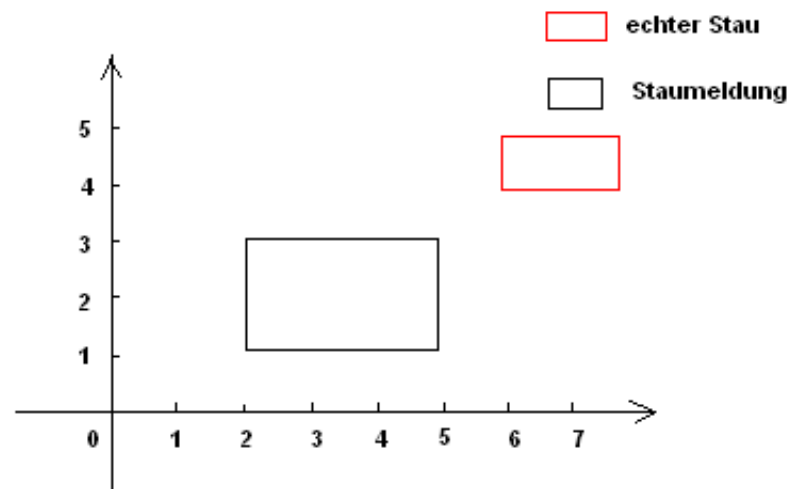


Abbildung 32: Qualitätskennzahlen Beispiel 4: tatsächliches Verkehrsereignis und rekonstruierte Verkehrsinformation stimmen nicht überein, weder Überlappung in zeitlicher noch in räumlicher Hinsicht

- **Beispiel 5: ER = 1/4 ; FAR = 5/7; ZG = 5/8; RG = 2/5**

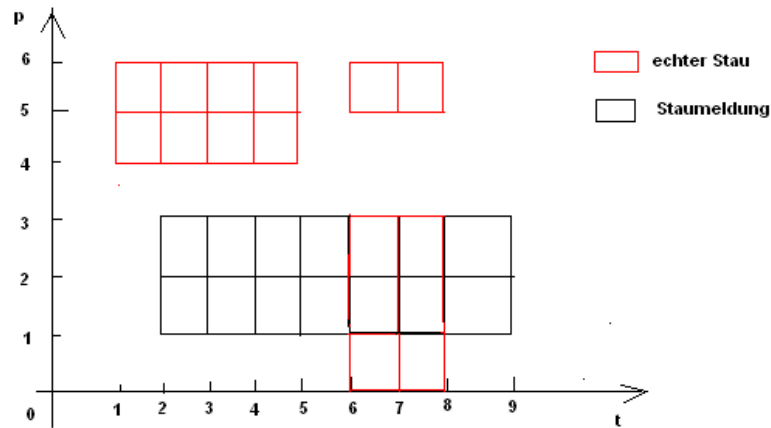


Abbildung 33: Qualitätskennzahlen Beispiel 5: komplexes, tatsächliches Verkehrsereignis und rekonstruierte Verkehrsinformation.

Als weitere, von der empfängerseitigen Datenverarbeitung unabhängige Größe wurde die **Verkehrnetzabdeckung** betrachtet. Sie stellt die Abdeckung des Verkehrsnetzes durch am verkehrstelematischen System partizipierende Fahrzeuge in einem Bezugszeitraum – der Simulationsdauer – dar. Damit kann ihr Zusammenhang zur Ausstattungsrate untersucht werden. Sie kann in zwei Varianten berechnet werden, die nachfolgend erläutert werden:

- **Verkehrnetzabdeckung Gesamtnetz [%]**

$$VNA_g = \frac{VNL_{pc}}{VNL_g}$$

Diese errechnet sich aus dem Verhältnis der Gesamtlänge VNL_{pc} derjenigen Segmente des Verkehrsnetzes, auf denen im Untersuchungszeitraum mindestens einmal ein partizipierendes Fahrzeug gefahren ist, zu der Gesamtlänge des Verkehrsnetzes VNL_g .

- **Verkehrnetzabdeckung befahrenes Netz [%]**

$$VNA_{bN} = \frac{VNL_{pc}}{VNL_{bN}}$$

Da davon ausgegangen werden muss, dass nicht alle Segmente des Verkehrsnetzes im Untersuchungszeitraum auch von Fahrzeugen befahren werden – dies betrifft sowohl partizipierende als auch nicht partizipierende Fahrzeuge – wird in VNL_{bN} die Gesamtlänge des überhaupt befahrenen Verkehrsnetzes berechnet. Das Verhältnis der Gesamtlänge VNL_{pc} derjenigen Segmente des Verkehrsnetzes, auf denen innerhalb des Untersuchungszeitraums mindestens einmal ein partizipierendes Fahrzeug entlang gefahren ist, zu der Gesamtlänge des befahrenen Verkehrsnetzes VNL_{bN} ergibt dann die Verkehrnetzabdeckung befahrenes Netz. Bei einer Ausstattungsrate von 100% wird diese Größe – im Gegensatz zur Verkehrnetzabdeckung Gesamtnetz – 100% annehmen.

Da nach Abschnitt 3.3.2 für die Auswahl der partizipierenden Fahrzeuge aus dem Gesamtkollektiv die Angabe des gewünschten Fahrzeugtyps möglich ist, kann bei Vorhandensein mehrerer Fahrzeugtypen wie im Anwendungsfall die maximal erreichbare Ausstattungsrate kleiner als 100% annehmen. Ebenso kann bei der Auswahl der Fahrzeuge in einem Zeitschritt die Anzahl der in diesem Zeitschritt neu in das Verkehrsnetz eingefahrenen Fahrzeuge kleiner sein als die zur Erreichung der vom Szenario geforderten Ausstattungsrate nötigen Fahrzeuge. Um dies aufzuzeichnen, wurden die erreichbaren Ausstattungsraten in Metriken protokolliert:

- **Maximal erreichbare Ausstattungsrate des geforderten Fahrzeugtyps [%]**
In ihr wurde die in einem Szenario für den geforderten Fahrzeugtyp maximal erreichbare Ausstattungsrate aufgezeichnet. Wurde als Fahrzeugtyp „all“ verwendet, kann diese Metrik 100% erreichen, wenn 100% Ausstattungsrate vorgegeben war. Wurde einer aus mehreren Fahrzeugtypen angegeben, ist ein kleinerer Wert zu erwarten.
- **Erreichte Ausstattungsrate des geforderten Fahrzeugtyps [%]**
Für jeden Zeitschritt wurde in dieser Metrik berechnet, wie hoch die tatsächliche Ausstattungsrate war und anschließend statistisch aufgezeichnet. Standen ausreichend neu in das Verkehrsnetz einführende Fahrzeuge des geforderten Fahrzeugtyps zur Verfügung, ist der Wert dieser Metrik gleich der vom Szenario geforderten Ausstattungsrate, ansonsten kleiner. Der Durchschnittswert, das Maximum und das Minimum über alle Zeitschritte, in denen Fahrzeuge ausgewählt werden mussten, wurden am Ende des Messdurchgangs von dieser Metrik bereitgestellt.

Im Anwendungsfall werden von Fahrzeugen Nachrichten an die Zentrale zur Rekonstruktion der Verkehrslage versendet. Daher kann es empfängerseitig zu einer **Redundanz** von Meldungen kommen, wenn empfangene Informationen nicht zu einer Verbesserung der Rekonstruktion der Verkehrslage führen, da die Informationen bereits von einem anderen Fahrzeug bereitgestellt wurden. Ob es zu einer Redundanz kommen kann, hängt von den Algorithmen des verwendeten Verfahrens ab. Da das Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren alle Meldungen im gleitenden Mittelwert verarbeitet, können hier keine Redundanzen auftreten. Für das Frequenzdomänenverfahren ist dies zwar prinzipiell möglich, aufgrund der hohen, positions- und damit metergenauen Auflösung ist dies jedoch sehr unwahrscheinlich und wurde deswegen auch nicht aufgezeichnet. Da die Metrik jedoch umgesetzt wurde und so für andere Verfahren zur Verfügung steht, wird sie hier dennoch genannt:

- **Redundanz von Nachrichten**
Sie wird von der die Verkehrslage rekonstruierenden Instanz (Fahrzeug oder Zentrale) berechnet, da im Verfahren entschieden werden muss, ob eine redundante Meldung vorliegt oder nicht. Daher kann auch keine allgemein gültige Berechnungsformel angegeben werden, die empfängerseitige Datenverarbeitung muss sie als Datum zur Verfügung stellen. Sie ist im Fall von dezentraler Kommunikation in der Lage, die Redundanz auch für die einzelnen lokalen Verkehrslagen in den Fahrzeugen zu berechnen.

4.4.1.3.2 Wirtschaftliche Charakteristik

Die wirtschaftliche Charakteristik vermisst die wirtschaftlichen Größen des verkehrstelematischen Systems. Wie in Abschnitt 3.2.4 bereits ausgeführt, zeichnet der verkehrstelematische Prüfstand dafür ähnlich den Metriken der technischen Charakteristik in den einzelnen Messdurchläufen die entstehenden Kostenmengen auf. Diese sind für ein gegebenes Szenario deterministisch. Die Überführung der Kostenmengen in tatsächliche Kosten kann durch Applizieren unterschiedlicher Kostenstrukturen, wie in Abschnitt 3.6.1.2 beschrieben, nach den Messdurchläufen erfolgen, indem auf die in der Datenbank hinterlegten wirtschaftlichen Messwerte zugegriffen wird. Da die Kostenmengen nach der Zuordnung der Kostenstruktur Kosten erzeugen, können sie den drei Kostenarten zugeordnet werden [KIS99]:

- Anschaffungskosten
- Fixkosten
- Variable Kosten

Anschaffungskosten sind einmalig bei Anschaffung anfallende Kosten, die für den Betrieb des verkehrstelematischen Systems notwendigerweise anfallen. Ein Beispiel könnte ein fahrzeugseitiges Navigationsgerät sein, um Informationen über das Verkehrsnetz im Fahrzeug verfügbar zu machen. Fixkosten sind unabhängig von kostenverursachenden Stückzahlen, als Beispiel sei eine für die Datenübertragung zu entrichtende Grundgebühr genannt. Variable Kosten betreffen die stückzahlenbezogenen Kosten wie zum Beispiel die zu versendenden Kurznachrichten im verkehrstelematischen System. Die einzelnen Kostenmengen der verschiedenen Kostenarten aufzeichnenden Metriken werden nachfolgend, geordnet nach den in Abschnitt 3.2.4 festgelegten, kostenmengenverursachenden Kostenmengenobjekte, vorgestellt. Diese Kostenmengen sind als kumulierte Summen der Kostenmengen innerhalb des Untersuchungszeitraums zu verstehen. Im Fall des Kostenmengenobjekts Fahrzeug können von Fahrzeug zu Fahrzeug Schwankungen in den Kostenmengen auftreten, diese werden zusätzlich zu den Summen der Kostenmengen statistisch in Form von Durchschnittswert, Maximum und Minimum aufgezeichnet.

Das Kostenmengenobjekt **Fahrzeug** unterscheidet sich in seinem Aufbau im dezentralen Kommunikationsfall vom Fahrzeug mit zentraler Kommunikation. Im dezentralen Fall müssen alle technischen Vorrichtungen für die Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation bereitgestellt werden, die im zentralen Kommunikationsszenario nicht benötigt werden. Abgesehen davon gelten die nachfolgend genannten Metriken für beide Varianten, die monetären Unterschiede sind dann in den Stückkosten zu berücksichtigen.

Als Anschaffungskosten wurden festgelegt (zentral und dezentral):

- **Kostenmenge fahrzeugseitige Datenverarbeitungs-, Sende und Empfangseinheit**
Die Kostenmengen für die Anschaffungskosten der Datenverarbeitungseinheit (Navigationsgerät, Telematikgerät, o.ä.), etwaiger Sensorik, der Sende- und der Empfangseinheit, sowie die damit verbundenen Einbaukosten wurden zusammengefasst, dies muss entsprechend bei der Festlegung der Stückkosten berücksichtigt werden.
- **Kostenmenge fahrzeugseitige Software**
Spezielle zum Betrieb des jeweiligen Verfahrens zu beschaffende Software wurde in dieser Kostenmenge aufgezeichnet.

Die Fixkosten wurden auf folgende definiert:

- **Kostenmenge Grundgebühr zentraler Übertragungskanal**
Die für die Datenübertragung von aus dem Fahrzeug versendeten Nachrichten anfallende Grundgebühr für den zentralen Übertragungskanal wird in dieser Kostenmenge behandelt.
- **Kostenmenge Grundgebühr dezentraler Übertragungskanal**
Die für die Datenübertragung von aus dem Fahrzeug versendete Nachrichten anfallende Grundgebühr für den dezentralen Übertragungskanal wird in dieser Kostenmenge behandelt.
- **Kostenmenge Servicegrundgebühr (zentral und dezentral)**
Diese Kostenmenge zeichnet eine etwaige für den Service des verkehrstelematischen Systems noch hinzukommende Grundgebühr auf.

Variable Kosten wurden folgendermaßen berücksichtigt:

- **Kostenmenge fahrzeugseitige Menge zentral versendeter Nachrichten**
In dieser Kostenmenge wurde die Menge der vom Fahrzeug über zentrale Kommunikation versendeten Nachrichten aufgezeichnet.
- **Kostenmenge fahrzeugseitige Menge zentral empfangener Nachrichten**
Diese Kostenmenge berücksichtigt die Menge der vom Fahrzeug über zentrale Kommunikation empfangenen Nachrichten.
- **Kostenmenge fahrzeugseitige Menge dezentral versendeter Nachrichten**
Die Menge der vom Fahrzeug über dezentrale Kommunikation versendeten Nachrichten wurde in dieser Kostenmenge bereitgestellt.
- **Kostenmenge fahrzeugseitige Menge dezentral empfangener Nachrichten**
Die dezentral vom Fahrzeug empfangene Menge an Nachrichten ist in dieser Metrik zusammengefasst.

Das Kostenmengenobjekt **Zentrale** ist nur in einem zentralen Kommunikationsszenario vorhanden und stellt die unten genannten Kostenmengen bereit:

Als Anschaffungskosten ist nur eine Kostenmenge vorhanden:

- **Kostenmenge zentralseitige Datenverarbeitungs-, Sende und Empfangseinheit**
Die Kostenmengen wurden ähnlich wie im Fahrzeug zusammengefasst und müssen entsprechend bei der Festlegung der Stückkosten berücksichtigt werden.

Ebenso gibt es nur eine Metrik für Fixkosten:

- **Kostenmenge zentralseitige Betriebskosten**
Alle anfallenden Fixkosten, die zum Betrieb der Zentrale benötigt werden (Personal-, Sach- und Wartungskosten), wurden in dieser Kostenmenge zusammengefasst und müssen entsprechend bei der Angabe der Stückkosten eingerechnet werden.

Als kommunikatives Spiegelstück zum Fahrzeug wurden die variablen Kosten festgelegt:

- **Kostenmenge zentralseitige Menge empfangener Nachrichten**
Die bei der Zentrale eingehende Nachrichtenmenge wurde in dieser Metrik aufgezeichnet.
- **Kostenmenge zentralseitige Menge versendeter Nachrichten**
Sollte die Zentrale Nachrichten über zentrale Kommunikation versenden, zeichnet diese Metrik die entstehende Menge auf.

Als letztes Kostenmengenobjekt ist der **Datenübertragungskanal** zu nennen. Es stehen dabei zentrale (up-link, down-link) und dezentrale (Fahrzeug-Fahrzeug) Übertragungskanäle zur Verfügung. Die Grundgebühren zur Nutzung dieser wurden bereits dem Kostenmengenobjekt Fahrzeug zugeschrieben. Für ein verkehrstelematisches System wurde der Übertragungskanal als bereits vorhanden definiert, was im Falle von zentraler Kommunikation etwa in Form eines Mobilfunknetzes der Realität entspricht und nicht in Form von Anschaffungskosten dem verkehrstelematischen System zugeordnet werden kann. Für die dezentrale Kommunikation wurden bereits im Fahrzeug die Kostenmengen für die notwendige Sende- und Empfangsinfrastruktur als Anschaffungskosten berücksichtigt, womit die Anschaffungskosten für das Kostenmengenobjekt Übertragungskanal entfallen.

Als variable Kosten verbleiben damit (up-link, down-link und Fahrzeug-Fahrzeug):

- **Kostenmenge Menge übertragener Nachrichten**
Für jeden in einem Szenario erzeugten Übertragungskanal wurde in dieser Metrik protokolliert, wie viele Nachrichten über ihn übertragen wurden. Die Aufzeichnung erfolgt dabei getrennt nach jedem einzelnen up-link-, down-link- und Fahrzeug-Fahrzeug-Übertragungskanal entsprechend den Vorgaben der Szenarioklasse. Diese Information kann für die wirtschaftliche Analyse, aber auch zur Analyse der Nachrichtenströme der einzelnen Übertragungskanäle verwendet werden, wenn mehrere Übertragungskanäle in einem Szenario vorhanden sind.

4.4.1.4 Vergleichbarkeit der Verfahren

Sollen die in Abschnitt 4.4.1.3 festgelegten Metriken zum Vermessen der Rekonstruktion der Verkehrslage verwendet werden, ist für die Kennzahlen der Qualität – Erkennungsrate, Falschalarmrate, räumliche Genauigkeit und zeitliche Genauigkeit – noch zu klären, wie die dafür benötigten räumlich-zeitlichen Ausdehnungen von tatsächlichem Verkehrsgeschehen und rekonstruierter Verkehrsinformation aus den empfängerseitig jeweils von den Verfahren erzeugten Größen berechnet werden können.

Wie in Abschnitt 4.2.2 beschrieben, werden beim Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren empfängerseitig gleitende Mittelwert der von den partizipierenden Fahrzeugen gemeldeten Segmentdurchschnittsgeschwindigkeiten erzeugt. Pro Segment liegt damit die aktuelle Durchschnittsgeschwindigkeit vor. Für das Frequenzdomänenverfahren des Abschnitts 2.2.3.3 mit den zentralseitigen Erweiterungen in Abschnitt 4.2.1 werden die von den Fahrzeugen versendeten, punktuellen Störungsinformationen zentralseitig zu Störungen zusammengefasst, sodass pro Segment eine oder mehrere positionsgenaue Störungen vorliegen.

Sollen die Ergebnisse dieser beiden Verfahren miteinander verglichen werden, stellt sich die Frage, wie die segmentbezogene Durchschnittsgeschwindigkeit mit der positionsgenauen Störung verglichen werden kann, um so daraus vergleichbare räumlich-zeitliche Ausdehnungen erzeugen zu können. Betrachtet man das Frequenzdomänenverfahren genauer, lässt sich festhalten, dass es aufgrund der fahrzeugseitigen Notwendigkeit zur Erzeugung von Störungsflanken seine fahrzeugseitig verfügbaren Eingangsdaten bewerten muss, um die Aussage treffen zu können, ob diese beispielsweise einer Störungseinfahrt entsprechen. Das Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren hingegen ist bewertungsfrei, da es lediglich die fahrzeugseitig verfügbaren Daten aufbereitet und verdichtet.

4.4.1.4.1 Level of Service

In [HRB65] wurde mit dem Highway Capacity Manual (HCM) der Version von 1965 das Konzept des Level of Service (LoS) eingeführt und in weiterer Folge weltweit übernommen, so zum Beispiel in das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS)⁵⁸. Dieses Konzept stellt sechs Qualitätsstufen für die Abwicklung von Verkehrsströmen bereit, anhand derer die Qualität des Verkehrsablaufs kategorisiert wird. Die definierten Stufen sind A, B, C, D, E und F, wobei LoS A die qualitativ höchste Stufe (freier Verkehrsfluss) und LoS F die Stufe schlechtester Qualität (überlastete Verkehrsanlage, Störung) darstellt⁵⁹. Die Einordnung in die Qualitätsstufen erfolgt dabei pro Segment durch Bewertung verkehrlicher Kenngrößen wie etwa der Verkehrsgeschwindigkeit. Gelingt es, die Ergebnisse der Verfahren nach diesem Konzept für jede der in Abschnitt 4.3 genannten Straßenklassen zu klassifizieren, steht damit ein international anerkannter Maßstab zur Verfügung, der die Vergleichbarkeit der Verfahren gewährleistet.

Da das Frequenzdomänenverfahren bereits fahrzeugseitig die Bewertung auf Störungsflanken vornimmt und eine Störung nach dem obigen Konzept durch LoS F charakterisiert wird, lässt sich das Frequenzdomänenverfahren einfach in das Level of Service-Konzept einordnen: jede zentralseitig erzeugte Störung kennzeichnet einen räumlichen Bereich des dazugehörigen Segments, für den der Level of Service die Stufe F annimmt.

Im Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren hingegen werden nicht nur gestörte Bereiche betrachtet, sondern wertfrei die Segmentdurchschnittsgeschwindigkeiten bereitstellt, demnach werden bei diesem Verfahren sämtliche Qualitätsstufen berücksichtigt. Dafür muss eine geeignete Überführung in das Level of Service-Konzept gefunden werden. Da makroskopische Verkehrskenngrößen wie die Verkehrsstärke oder die Verkehrsdichte im Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren nicht zur Verfügung stehen⁶⁰, muss sich die Bewertung der Qualitätsstufen an den im verkehrstelematischen System vorhandenen Größen orientieren. Neben dieser Einschränkung muss auch eine Unterscheidung der verschiedenen im Verkehrsnetz des Abschnitts 4.3 vorkommenden Straßenklassen möglich sein.

⁵⁸ [FGS01], S. 2-12

⁵⁹ [FGS01], S. 2-12

⁶⁰ Dies ist eine Einschränkung, die die meisten verkehrstelematischen Systeme gemein haben. Es ist zwar prinzipiell denkbar, die Verfahren derart zu modifizieren und ggf. lokale Infrastruktur zu integrieren, dass auch makroskopische Verkehrskenngrößen bereitgestellt werden, dies wird aus Performanz- und Kosten/Nutzenüberlegungen jedoch nur dann geschehen, wenn dies die umzusetzende Zielanwendung direkt unterstützt und einen signifikanten Mehrwert erzeugt. In den bekannten Floating Car Data Systemen wird dies jedoch nicht mit berücksichtigt.

Zur Klassifizierung stehen mehrere Arbeiten zur Auswahl. Im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen werden für Autobahnabschnitte, zweistreifige Landstraßen und Knotenpunkte Klassifizierungen in Level of Service angegeben [FGS01]. Da Knotenpunkte in Floating Car Data-Verfahren nicht direkt, sondern nur implizit in den an sie anschließenden Segmenten berücksichtigt werden, sind diese für die gesuchte Klassifizierung nicht relevant. Die zweistreifigen Landstraßen werden mittels der Verkehrsdichte kategorisiert, die als makroskopische Größe ebenfalls nicht verwendbar ist. Die Qualitätsstufen für Autobahnabschnitte jedoch werden anhand der mittleren Reisegeschwindigkeit der Pkws kategorisiert, und können daher für die Klassifizierung von Segmenten der Straßenklasse Autobahn verwendet werden. Da die im Verkehrsnetz für diese Straßenklasse festgelegte zulässige Geschwindigkeit nach Tabelle 11 mit 120 Kilometer/Stunde begrenzt ist, der Schwellwert für den LoS A jedoch bei 130 Kilometer/Stunde liegt, würde sich eine Verfälschung der Level of Service ergeben. Daher wurde eine Skalierung der Schwellwerte vorgenommen, indem sie prozentuell auf 120 Kilometer/Stunde berechnet wurden. Die resultierenden Schwellenwerte sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

In [SCB97a] werden zwei weitere Ansätze für die Kategorisierung des Level of Service vorgestellt⁶¹: das bereits genannte Highway Capacity Manual als auch eine Kategorisierung von Brilon [BRI93]. In [BRI93] werden für zweistreifige Landstraßen pro Level of Service mittlere Reisegeschwindigkeiten angegeben, die zur gesuchten Klassifizierung herangezogen werden können. Diese Schwellwerte wurden auf die Straßenklasse Bundesstraße appliziert. Für die Straßenklasse Schnellweg mit einer zulässigen Geschwindigkeit von 80 Kilometer/Stunde konnten keine Angaben gefunden werden. Aufgrund der betragsmäßigen Nähe zu der zulässigen Geschwindigkeit von 100 Kilometer/Stunde der Straßenklasse Bundesstraße wurden die Schwellenwerte ähnlich denen für die Straßenklasse Autobahn auf die zulässige Geschwindigkeit von 80 Kilometer/Stunde skaliert, obwohl die beiden Straßenklassen von unterschiedlichem Typus sind. Die resultierenden Schwellenwerte sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Die verbleibenden Straßenklassen der Tabelle 11 betreffen die Stadtstraßen. Für diese sind im Highway Capacity Manuals in der Ausgabe des Jahres 2000 (HCM2000) Schwellwerte in unterschiedlichen Geschwindigkeitsklassen zu finden [TRB00]. Die HCM2000 unterteilt dabei die Stadtstraßen anhand der freien Verkehrsflussgeschwindigkeit. Diese ist laut HCM2000 eine Idealgeschwindigkeit, also die Geschwindigkeit, die erreicht wird, wenn die Verkehrsdichte extrem niedrig ist und im Fall von Stadtstraßen zusätzlich keine Unterbrechungen durch Lichtsignalanlagen vorhanden sind⁶².

Für die gesuchte Klassifizierung muss die freie Verkehrsflussgeschwindigkeit herangezogen werden, um die korrekte Liste der Schwellenwerte für die Einordnung in den Level of Service-Raster zu erhalten. Betrachtet man die Definition der freien Verkehrsflussgeschwindigkeit, interpretiert sie für ein Straßensegment als höchste erreichbare Geschwindigkeit und nimmt an, dass die Fahrer der Fahrzeuge nach Möglichkeit die höchstmögliche Geschwindigkeit gemäß

⁶¹ [SCB97a], S. 93ff

⁶² [TRB00], S. 5-6

ihrer Präferenzen⁶³ erreichen wollen, so kann im statistischen Mittel eine Übereinstimmung der freien Verkehrsflussgeschwindigkeit und der zulässigen Geschwindigkeit für ein Segment angenommen werden. Da im verkehrstelematischen Prüfstand für jedes Segment die Straßenklasse und die zulässige Geschwindigkeit nach Tabelle 11 vorliegen, kann die Klassifizierung anhand dieser Eingangswerte in einen Level of Service erfolgen.

Die Schwellenwerte selbst sind im HCM2000 in Meilen/Stunde niedergeschrieben, AIMSUN arbeitet jedoch mit metrischen Einheiten. Die Umrechnung auf Kilometer/Stunde ist trivial, die freien Verkehrsflussgeschwindigkeiten müssen jedoch auch umgerechnet werden, als Resultat ergeben sich Werte, die nicht exakt den zulässigen Geschwindigkeiten der Straßenklassen im Verkehrsnetz entsprechen.

Als Beispiel entspricht eine freie Verkehrsflussgeschwindigkeit von 35 Meilen/Stunde im metrischen System 56,33 Kilometer/Stunde. Da die Schwellenwerte damit aber nur für 56,33 Kilometer/Stunde vorliegen, für die Straßenklasse Hauptverkehrsstraße aber nach Tabelle 11 eine zulässige Geschwindigkeit von 50 Kilometer/Stunde erforderlich ist, sind die benötigten Werte durch logarithmische Interpolation⁶⁴ mit den Werten des HCM2000 als Stützstellen ermittelt worden. Nach dieser Systematik sind alle freien Verkehrsflussgeschwindigkeiten als auch die dazugehörigen Schwellenwertgeschwindigkeiten der LoS A-F berechnet worden.

Einen Sonderfall stellt die zulässige Geschwindigkeit von 30 Kilometer/Stunde dar. Die niedrigste, im HCM2000 vorkommende Geschwindigkeit für Stadtstraßen betrug 30 Meilen/Stunde, das entspricht 48,28 Kilometer/Stunde. Um die Klassifizierung in der beschriebenen Art auch für diese Straßenklasse durchführen zu können, wurden die Schwellenwerte aller städtischen Straßenklassen des HCM2000 als Stützstellen für eine kubische Interpolation⁶⁴ auf eine freie Verkehrsflussgeschwindigkeit von 30 Kilometer/Stunde verwendet.

Zusammengefasst ergeben sich damit die in Tabelle 12 gelisteten Schwellenwerte, die für die Klassifizierung des Ergebnisses des Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahrens nach Level of Service verwendet wurden. Sie wurden jeweils gerundet und sind dergestalt zu verwenden, dass eine Geschwindigkeit, die größer oder gleich dem angegebenen Schwellenwert zur Einordnung in den zugehörigen Level of Service führt. Dabei wird bei LoS A begonnen und überprüft, ob eine Zuordnung möglich ist, wenn dies nicht der Fall ist, wird mit dem nächsten LoS Schwellenwert so lange eine Zuordnung versucht, bis dies möglich ist. Die Zuordnung zu LoS F ergibt sich dann als Residualgröße, nämlich wenn die Geschwindigkeit kleiner dem Schwellenwert für LoS E ist.

⁶³ In AIMSUN ist der Akzeptanzgrad von Geschwindigkeitsbeschränkungen von simulierten Fahrern als Modellparameter vorhanden. Verschiedene Akzeptanzgrade sind in den Verkehrsnetzdaten des Abschnitts 4.3 bereits berücksichtigt worden.

⁶⁴ Die Art der Interpolation wurde nach dem Best-Fit-Prinzip ausgewählt.

	Erschließungs- straße	Sammel- straße	Hauptverkehrs- straße	Ein-/Ausfahrt- rampe
Zulässige Geschwindigkeit	30	30	50	60
<i>Quelle</i>	<i>HCM2000</i>	<i>HCM2000</i>	<i>HCM2000</i>	<i>HCM2000</i>
LoS A	24	24	42	52
LoS B	17	17	32	42
LoS C	10	10	23	32
LoS D	6	6	16	25
LoS E	4	4	12	18
	City Ring	Schnellweg	Bundesstraße	Autobahn
Zulässige Geschwindigkeit	70	80	100	120
<i>Quelle</i>	<i>HCM2000</i>	<i>Brilon</i>	<i>Brilon</i>	<i>HBS</i>
LoS A	60	72	90	120
LoS B	49	64	80	115
LoS C	38	56	70	106
LoS D	30	48	60	92
LoS E	23	40	50	74

Tabelle 12: Schwellenwerte der Level of Service [km/h]

4.4.1.4.2 Referenzverkehrslage

Mit dem Level of Service-Konzept liegt ein Vergleichsmaßstab vor, der die Ergebnisse der Verfahren in vergleichbarer Form bereitstellt. Damit können die rekonstruierten Verkehrsinformationen, die in den Qualitätskennzahlen des Abschnitts 4.4.1.3.1 verwendet werden, in Level of Service ausgedrückt werden. Wie die ebenso darin geforderten tatsächlichen Verkehrereignisse zur Verfügung gestellt werden, ist bisher jedoch noch unbeantwortet geblieben. Da die Qualitätskennzahlen auf einem Vergleich mit einer Referenz basieren, muss eine Referenzverkehrslage erzeugt werden, die diese tatsächlichen Verkehrereignisse feststellt und die sich ebenso in Level of Service ausdrücken lässt. Damit können dann die geforderten räumlich-zeitlichen Ausdehnungen von rekonstruierter Verkehrsinformation und tatsächlichem Verkehrereignis anhand von Level of Service berechnet werden.

Für einen Vergleich der räumlich-zeitlichen Ausdehnungen von tatsächlichem Verkehrereignis und rekonstruierter Verkehrsinformation muss noch nach den einzelnen Level of Service unterschieden werden, denn es sollen nur räumlich-zeitliche Ausdehnungen gleichen Level of Service miteinander verglichen werden. Dies wurde dadurch gewährleistet, dass die in Abschnitt 4.4.1.3.1 genannten Qualitätskennzahlen nicht nur einmal aufgenommen wurden, sondern jeweils einmal für die Level of Service B bis F. LoS A wurde nicht mit berücksichtigt, da die Erkennung von Störungen im Vordergrund stand.

Darüber hinaus muss die Referenzverkehrslage noch in der Lage sein, die tatsächlichen Verkehrereignisse sowohl in strecken- als auch in positionsgenauer Weise bereitzustellen. Dies ermöglicht den Vergleich eines positionsgenauen Verfahrens mit einer positionsgenauen Referenzverkehrslage und gleiches für den streckengenauen Fall. Die Vergleichbarkeit der

Verfahren untereinander ist dann über die Qualitätskennzahlen des einzelnen Level of Service gegeben.

Die Referenzverkehrslage soll dabei der verkehrlichen Realität – im Anwendungsfall also dem Verkehrsgeschehen in AIMSUN – bestmöglich entsprechen, alle in AIMSUN verfügbaren Informationen können prinzipiell dafür genutzt werden. Damit wird die Referenzverkehrslage als die Realität definiert, mit der die Verfahren verglichen werden. Streng genommen stellt die Referenzverkehrslage aber auch ein Verfahren zur Rekonstruktion einer netzweiten Verkehrslage dar, das im Gegensatz zu den auf die partizipierenden Fahrzeuge angewiesenen empfängerseitigen Datenverarbeitungen prinzipiell alle Daten der mikroskopischen Simulation zur Verfügung hat. So stehen für sie die Daten aller Fahrzeuge ohne die Einschränkung der Ausstattungsrate bereit, aber auch makroskopische Verkehrskenngrößen. Um die Abhängigkeit der zu untersuchenden Verfahren vom Verfahren zur Rekonstruktion der Referenzverkehrslage möglichst gering zu halten, wird im Verfahren zur Erzeugung der Referenzverkehrslage die gleiche Vorgehensweise wie für die Verfahren verwendet, es werden also keine makroskopischen Verkehrskenngrößen zusätzlich berücksichtigt. Dies stellt für den vorliegenden Anwendungsfall eine Einschränkung dar, kann für andere Untersuchungen jedoch einfach geändert werden und wird deswegen für die Zielsetzung der Validierung der Methode als nicht kritisch eingestuft.

Im Detail wurde die Referenzverkehrslage aus den Geschwindigkeiten aller Fahrzeuge berechnet. Da ihr immer die aktuellen Positionen und Geschwindigkeiten aller Fahrzeuge im gesamten Verkehrsnetz zur Verfügung stehen, liegen ihr zum einen mehr Daten und zum anderen aktuellere Daten vor, da nicht gewartet werden muss, bis ein Fahrzeug ein Segment durchfahren hat, um dann die Daten zur weiteren Bearbeitung zu versenden. Für jedes Segment wurde daher die Durchschnittsgeschwindigkeit aus den aktuellen Geschwindigkeiten aller sich in diesem Segment befindenden Fahrzeuge berechnet. Um die bereits im Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren erwähnten Schwankungen bedingt durch die unvermeidbaren Haltezeiten an den Lichtsignalanlagen zu berücksichtigen, wurde pro Segment eine Historie dieser Durchschnittsgeschwindigkeiten gespeichert und daraus ein gleitender Mittelwert errechnet. Anders als im Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren sind für die Referenzverkehrslage die maximalen Umlaufzeiten aller Segmente bekannt, weswegen für den gleitenden Mittelwert genau dieses Zeitfenster für die Mittelung verwendet wurde.

Die Einordnung in den Level of Service-Raster erfolgte ebenso nach Tabelle 12, um auch hier die Einflüsse der Referenz möglichst gering zu halten. Für die Bereitstellung positionsgenauer Verkehrereignisse musste eine Möglichkeit gefunden werden, den für ein Segment errechneten Level of Service räumlich einzugrenzen, damit errechnet werden kann, wo die Geschwindigkeit den Schwellenwert, der zu dem errechneten Level of Service geführt hat, unterschritten hat. Dies ist für die Referenz möglich, da ihr zu jedem Zeitpunkt die Position und die Geschwindigkeit jedes einzelnen Fahrzeugs im Segment zur Verfügung stehen. Beginnend mit dem Segmentanfang wurde in Fahrtrichtung die Geschwindigkeit jedes Fahrzeuges im Segment mit dem Schwellenwert des errechneten Level of Service verglichen und der Beginn des Verkehrereignisses (des betrachteten Level of Service) dort festgelegt, wo die Geschwindigkeit eines Fahrzeug diesen Schwellenwert unterschreitet. Analog wurde für das Ende des Verkehrereignisses das Überschreiten des Schwellenwertes festgelegt. Konnte eine der beiden Positionen nicht errechnet werden, so wurde bei Fehlen der Beginnposition der Segmentanfang und bei Fehlen der Endposition das Segmentende als Position festgelegt.

4.4.2 Szenarioklassen

Für die beiden festgelegten Verfahren wurden sowohl für die Hauptuntersuchung als auch für die Sensitivitätsanalysen vier Szenarioklassen festgelegt:

- **Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren im zentralen Kommunikationsfall**
 Hier wurden Fahrzeuge vom Typ „zentrales Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren“ über einen up-link vom Typ „zentraler Übertragungskanal“ mit einer Zentrale vom Typ „Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren“ verbunden. Da die Zielanwendung auf die Rekonstruktion der Verkehrslage festgelegt wurde, war kein down-link notwendig. Ebenso bestand keine Notwendigkeit zur Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation. Als Ausstattungsraten wurden 1%, 3%, 5%, 7%, 9%, 11%, 15%, 25%, 35%, 45%, 55%, 65%, 75%, 85% und 100% vorgegeben.
- **Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren im dezentralen Kommunikationsfall über WLAN**
 Im dezentralen Fall wurden die Fahrzeuge vom Typ „ad hoc Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren“ über einen Fahrzeug-Fahrzeug-Übertragungskanal vom Typ „Fahrzeug-Fahrzeug-WLAN“ miteinander verbunden. Als reiner dezentraler Kommunikationsfall wurde weder up-link noch down-link benötigt. Die vorgegebenen Ausstattungsraten waren: 1%, 3%, 5%, 7%, 9%, 11%, 13%, 15%, 25%, 30%, 45%, 55%, 65%, 75%, 85% und 100%.
- **Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren im dezentralen Kommunikationsfall über UTRA TDD⁶⁵**
 In dieser Szenarioklasse ermöglichte ein Fahrzeug-Fahrzeug-Übertragungskanal vom Typ „Fahrzeug-Fahrzeug-UTRA-TDD“ die Kommunikation zwischen Fahrzeugen vom Typ „ad hoc Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren“. Es wurde weder up-link noch down-link verwendet. Als Ausstattungsraten wurden 1%, 3%, 5%, 7%, 9%, 11%, 13%, 15%, 25%, 30%, 45%, 55%, 65%, 75%, 85% und 100% festgelegt.
- **Frequenzdomänenverfahren im zentralen Kommunikationsfall**
 Als zentraler Kommunikationsfall war kein Fahrzeug-Fahrzeug-Übertragungskanal erforderlich, die Fahrzeuge vom Typ „zentrales Frequenzdomänenverfahren“ kommunizierten über einen up-link vom Typ „zentraler Übertragungskanal“ mit einer Zentrale vom Typ „Frequenzdomänenverfahren“. Die Menge der Ausstattungsraten wurde auf 1%-13% in 1%-Schritten, sowie 15%, 21%, 25%, 29%, 35%, 45%, 55%, 65%, 75%, 85% und 95% vorgegeben.

4.4.3 Szenarien

Im Rahmen der betreuten Arbeit [JIN05] wurden für die Kalibrierung Durchschnittswerte realer Systeme ermittelt und in der Datenbank hinterlegt. Der Schwerpunkt lag dabei nicht auf der Untersuchung der Einflüsse durch verschiedene Kalibrierungen – was prinzipiell im verkehrstelematischen Prüfstand mögliche wäre – sondern zielte darauf ab, eine Übereinstimmung in den Größenordnungen zu erzielen.

⁶⁵ UMTS wird üblicherweise im Zusammenhang mit zentraler Kommunikation genannt. Hier wird damit das bereits in Abschnitt 2.2.3.4 erwähnte, für FleetNet modifizierte UTRA TDD als Alternative zu WLAN betrachtet.

Für den zentralen Übertragungskanal wurde als Übertragungstechnologie GSM-SMS verwendet und für die übertragungstechnischen Parameter folgende Werte angewandt:

- Durchschnittliche Verzögerungszeit: 8 ± 4 Sekunden
- Durchschnittliche Übertragungsdauer: 0 Sekunden
- Durchschnittliche Verlustrate von Nachrichten: 0 Prozent
- Durchschnittliche Übertragungreichweite: unbegrenzt

Als Übertragungstechnologie für die dezentralen Szenarioklassen wurden UTRA TDD und WLAN verwendet. WLAN wurde dabei mit folgenden Werten belegt:

- Durchschnittliche Verzögerungszeit: 4 ± 1 Sekunden
- Durchschnittliche Übertragungsdauer: 0 Sekunden
- Durchschnittliche Verlustrate von Nachrichten: 0 Prozent
- Durchschnittliche Übertragungreichweite: 100 ± 50 Meter

Für UTRA TDD kamen diese Werte zur Anwendung:

- Durchschnittliche Verzögerungszeit: 4 ± 1 Sekunden
- Durchschnittliche Übertragungsdauer: 0 Sekunden
- Durchschnittliche Verlustrate von Nachrichten: 0 Prozent
- Durchschnittliche Übertragungreichweite: 350 ± 250 Meter

Die statische Verwaltungsdatengröße wurde auf 1 Byte festgelegt, die der dynamischen auf 0 Byte, da der Schwerpunkt der Untersuchungen nicht auf die bytegenaue Größenerfassung gelegt wurde, sondern auf das Erfassen der Anzahl der im verkehrstelematischen System fließenden Nachrichten.

Die Ortungstechnologie wurde als positionsgenau festgelegt. Dies entspricht zwar keiner real existierenden Ortungstechnologie, da im Rahmen der Untersuchungen jedoch durch die Qualitätskennzahlen unter anderem die räumlich genaue Auflösung der Verfahren untersucht werden sollte, erschien es sinnvoll, die Einflüsse der Ortungstechnologie auszuschließen. Sollte sich in nachfolgenden Untersuchungen der Schwerpunkt derart verlagern, dass diese Einflüsse mit betrachtet werden sollen, kann dies durch einfaches Verändern der in der Datenbank hinterlegten Werte geschehen.

Betriebsparameter für die fahrzeugseitige Datenverarbeitung waren nicht erforderlich. Als Betriebsparameter der empfängerseitigen Datenverarbeitung wurde für das Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren die Länge des Zeitfensters für die Ermittlung des gleitenden Mittelwerts der Segmentdurchschnittsgeschwindigkeiten mit 120 Sekunden angegeben. Für das Frequenzdomänenverfahren waren keine Betriebsparameter für die empfängerseitige Datenverarbeitung nötig.

Die Verschaltung der Fahrzeuge und Zentralen mit den Datenverarbeitungen erfolgte derart, dass in zentralen Kommunikationsszenarien Fahrzeuge nur mit einer fahrzeugseitigen Datenverarbeitung verschalten wurden und Zentralen nur mit einer empfängerseitigen Datenverarbeitung. Dass hierbei jeweils dasselbe Verfahren verwendet wurde, ist über die Szenarioklasse bereits geregelt worden. Im dezentralen Fall wurden Fahrzeuge nicht nur mit der fahrzeugseitigen, sondern auch mit der empfängerseitigen Datenverarbeitung verschalten, um so die lokalen Verkehrslagen erzeugen zu können.

Für die Auswahl der partizipierenden Fahrzeuge aus dem Gesamtkollektiv wurde als Fahrzeugart „Pkw“ verwendet.

4.5 Ergebnisse

Die Resultate der in Abschnitt 4.4 festgelegten Untersuchungen für den Anwendungsfall werden in diesem Abschnitt vorgestellt. Der Schwerpunkt wurde dabei nicht auf tiefgründige Analysen der Ergebnisse gelegt, sondern auf die Demonstration, dass die Methodik mit Rahmenwerk und dem darin umgesetzten Anwendungsfall dazu in der Lage sind, den in Abschnitt 3 identifizierten Informationsmangel zu beheben, also auf die Vorstellung der erzielten Messergebnisse. Anhand dieser Messergebnisse können dann erste Analysen durchgeführt werden. Im Rahmen dieser Analyse kann im Allgemeinen die Notwendigkeit zur Bereitstellung weiterer Messwerte, gegebenenfalls sogar zusätzlicher Metriken zur Klärung offener Punkte entstehen, die in anschließenden Iterationsschritten vom verkehrstelematischen Prüfstand bereitgestellt werden können. Wo immer dies sinnvoll erschien, wurden in diesem Abschnitt zu den vorgestellten Messergebnissen jedoch auch die genannten ersten Analysen mit angegeben und diskutiert.

4.5.1 Hauptuntersuchung

Ziel der Hauptuntersuchung ist die Validierung der Methodik durch Bereitstellung der Ergebnisse der Metriken für die in Abschnitt 4.4 festgelegten Szenarien. Sie werden nachfolgend detailliert vorgestellt.

4.5.1.1 Maximal erreichbare und erreichte Ausstattungsrate des geforderten Fahrzeugtyps

Die **maximal erreichbare Ausstattungsrate des geforderten Fahrzeugtyps** nahm für die Untersuchungen den Wert 89,9% an. Da der geforderte Fahrzeugtyp auf „Pkw“ festgelegt wurde, bedeutet dies, dass selbst bei einer vorgegebenen Ausstattungsrate nur rund 90% aller Fahrzeuge des Gesamtkollektivs für das verkehrstelematische System ausgewählt werden konnten. Der Grund liegt im Schwerverkehrsanteil, der für die Sicherstellung realistischer verkehrlicher Randbedingungen aus den Verkehrsnetzdaten von [MAT07] beibehalten wurde. Alle nachfolgend gezeigten Diagramme weisen daher eine maximale Ausstattungsrate von 90% aus.

Abgesehen von dieser Einschränkung stimmte die **erreichte Ausstattungsrate des geforderten Fahrzeugtyps** praktisch mit der geforderten Ausstattungsrate überein, die Abweichung erreichte kaum nennenswerte Größen. Bis zu einer Ausstattungsrate von 55% war sie bei Rundung auf drei Stellen genau nicht messbar, bis 85% betrug sie bei gleicher Rundung 0,1% und bei 95% und 100% kam die maximal erreichbare Ausstattungsrate von 90% zum Tragen.

4.5.1.2 Minimum, Durchschnitt und Maximum der Qualitätskennzahlen

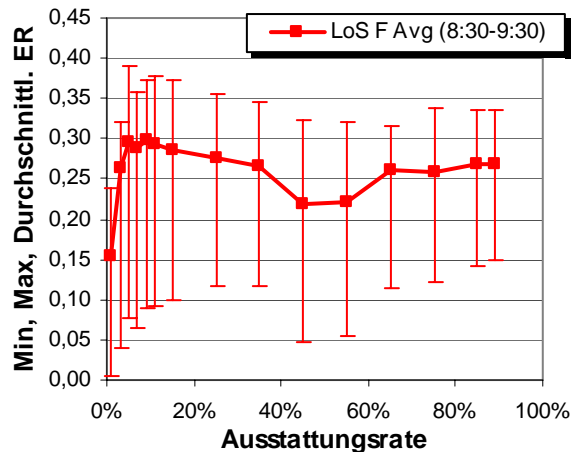


Abbildung 34: Minimale, durchschnittliche und maximale Erkennungsrate für LoS F am Beispiel der Szenarioklasse Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren im zentralen Kommunikationsfall für die Verkehrsnachfrage von 8:30 Uhr bis 9:30 Uhr

Für die Qualitätskennzahlen jedes Level of Service wurden für jede Ausstattungsrate sowohl die im Untersuchungszeitraum minimal, durchschnittlich und maximal erreichten Messwerte aufgezeichnet. Für jede Qualitätskennzahl würde sich damit pro Level of Service eigentlich ein Kurvenverlauf mit Minimum, Durchschnitt und Maximum pro Ausstattungsrate wie in Abbildung 34 dargestellt ergeben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und wegen des repräsentativen Charakters des Durchschnittswerts werden im Folgenden jedoch nur die durchschnittlichen Werte dargestellt und diskutiert.

4.5.1.3 Qualitätskennzahlen Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren, zentrale Kommunikation

Die Qualitätskennzahlen der Szenarioklasse Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren im zentralen Kommunikationsfall erzielten für die Verkehrsnachfrage von 8:30 Uhr bis 9:30 Uhr die besten Werte. Die Veränderungen der erzielten Ergebnisse unter Verwendung der Verkehrsnachfrage von 6:30 Uhr bis 7:30 Uhr und 7:30 bis 8:30 Uhr werden in der Sensitivitätsanalyse Verkehrsnachfrage in Abschnitt 4.5.2.4 betrachtet.

In Abbildung 35 sind die Ergebnisse, getrennt nach Level of Service, anhand der durchschnittlichen Erkennungsrate, Falschalarmrate, zeitlichen Genauigkeit und räumlichen Genauigkeit über die Ausstattungsrate dargestellt. Als Zufallsstartzahl wurde 30432 verwendet, das Abtastintervall betrug 1 Sekunde und die Simulationsdauer war mit einer Stunde festgelegt.

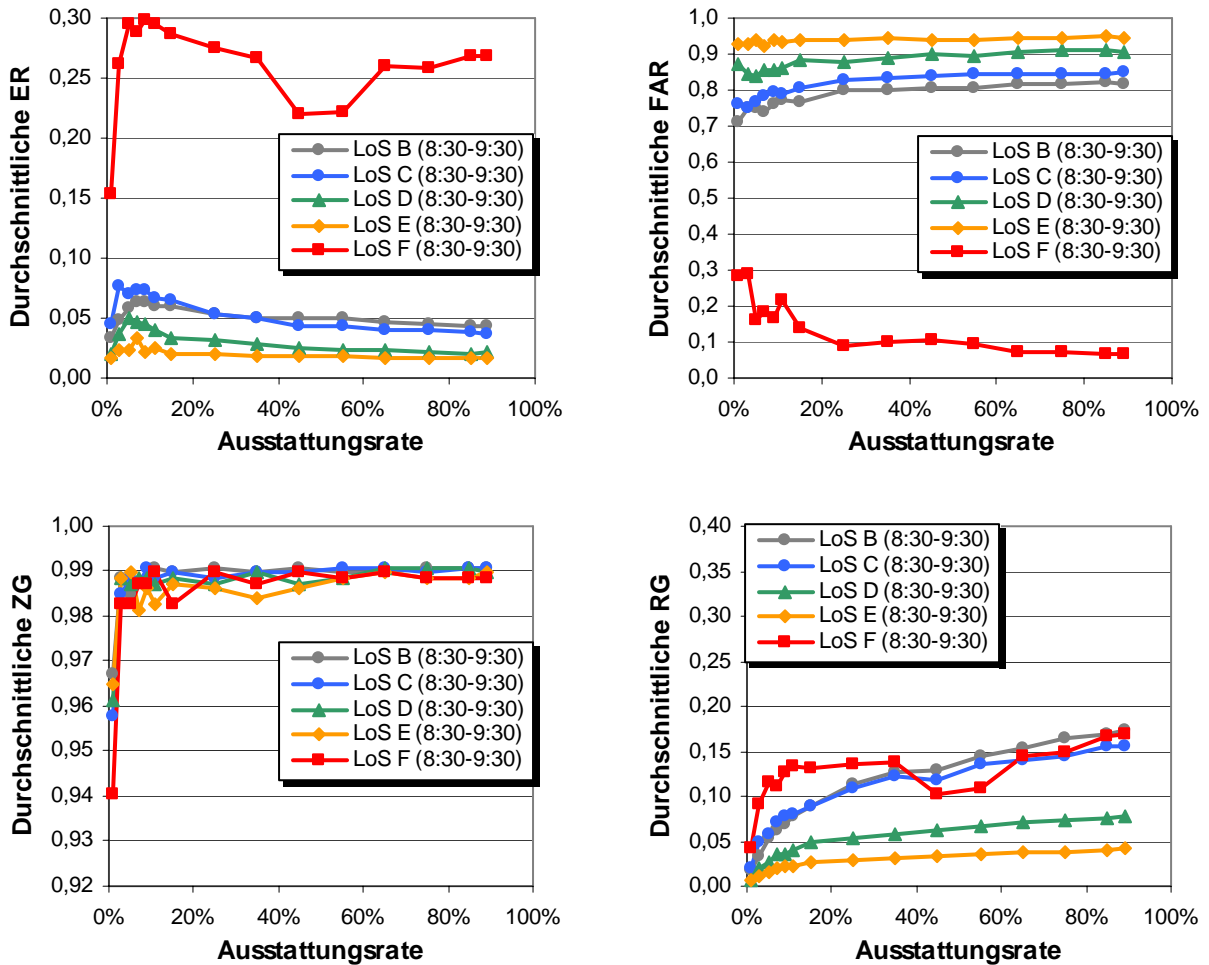


Abbildung 35: Qualitätskennzahlen der Szenarioklasse Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren im zentralen Kommunikationsfall für die Verkehrsnachfrage von 8:30 Uhr bis 9:30 Uhr

Beginnend mit der **durchschnittlichen Erkennungsrate** nahm diese, getrennt nach Level of Service betrachtet, folgende minimalen und maximalen Werte an, in Klammer ist jeweils die zugehörige Ausstattungsrate genannt (zur besseren Unterscheidung wurde die Erkennungsrate als Dezimalwert und die Ausstattungsrate in Prozent angegeben):

	Minimum	Maximum
LoS B	0,034 (1%)	0,064 (7%)
LoS C	0,037 (89%)	0,076 (3%)
LoS D	0,020 (1%)	0,050 (5%)
LoS E	0,017 (1%)	0,033 (7%)
LoS F	0,154 (1%)	0,299 (9%)

Die Minima befanden sich mit Ausnahme von LoS C alle bei der niedrigsten vorgegebenen Ausstattungsrate von 1%. Für LoS C ergab sich das Minimum bei 89% Ausstattungsrate, wobei angemerkt werden muss, dass dieses den Wert für 1% Ausstattungsrate nur um 0,8% unterschritt. Die Maxima ergaben sich zwischen Ausstattungsraten von 3% bis 9%.

Die Erkennungsraten der einzelnen Level of Service lagen dabei auf unterschiedlichem Niveau, wobei LoS F besonders auffällt, da sein Minimalwert um 0,078 über dem höchsten Maximalwert der anderen Level of Service (LoS C) lag. Für LoS F ergab sich also die mit Abstand beste Erkennungsrate im Vergleich der einzelnen Level of Service. Die Erkennungsrate von 0,15 bereits bei einer Ausstattungsrate von 1% bedeutet, dass schon bei dieser geringen Ausstattungsrate 15% der vorkommenden Verkehrereignisse mit rekonstruierten Verkehrsinformationen übereinstimmten. Das Maximum der Erkennungsrate für LoS F fiel mit 0,299 relativ niedrig aus. Besonders bemerkenswert war, dass dieses Maximum nicht bei sehr hohen Ausstattungsraten auftrat, sondern bereits bei einer Ausstattungsrate von 9%. Danach nahmen die Werte der durchschnittlichen Erkennungsrate wieder ab und näherten sich mit zunehmender Ausstattungsrate dem Niveau der höchsten Ausstattungsrate abflachend an. Bei 45% und 55% Ausstattungsrate gab es einen von diesem Verlauf abweichenden Sprung der Erkennungsrate von etwa 0,045 nach unten. Die anderen Level of Service erzielten deutlich niedrigere Ergebnisse, folgten aber im Wesentlichen dem beschriebenen Verlauf, wobei der Sprung bei 45% und 55% aufgrund des deutlich niedrigerem Niveaus der Werte kaum sichtbar ist.

Betrachtet man diese Werte, so ist festzuhalten, dass bei einer maximalen durchschnittlichen Erkennungsrate von 0,076 für die LoS B bis E die Erkennung von Verkehrereignissen des Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren im zentralen Kommunikationsfall für diese Level of Service unzureichend erfolgte.

Für den LoS F erfolgte die Erkennung um Größenordnungen genauer. Die Fähigkeit des Verfahrens, 15% der räumlich-zeitlich Ausdehnung der vorkommenden Verkehrereignisse bereits bei einer Ausstattungsrate von 1% zu erkennen, spricht für das Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren. Dem steht die maximale durchschnittliche Erkennungsrate von 0,299 gegenüber, was bedeutet, dass das Verfahren im besten Fall in der Lage ist, etwa 30% der räumlich-zeitlichen Ausdehnung der Verkehrereignisse zu erkennen, was auf Optimierungsbedarf hindeutet.

Der Sprung der Erkennungsrate von etwa 0,045 bei 45% und 55% Ausstattungsrate war zunächst schwer zu erklären. Im Vorgriff auf die Sensitivitätsanalyse Zufallsstartzahl des Abschnitts 4.5.2.1.1 fiel jedoch auf, dass Variationen der Zufallsstartzahl auf die durchschnittliche Erkennungsrate speziell des LoS F einen Einfluss in Form einer mittleren Schwankung von 4,5% ausübten. Aufgrund der deutlichen Ähnlichkeit der beiden Schwankungen wurde der Einfluss der Zufallsstartzahl als Ursache angenommen. Dass sich dieser Einfluss in seiner vollen Größe nur bei diesen beiden Ausstattungsrate auswirkte, konnte mit dem Auswahlprozess von partizipierenden Fahrzeugen erklärt werden: da nach Abschnitt 3.3.2 bei Bedarf jedes x -te der im Zeitschritt neu in das Verkehrsnetz einfahrenden Fahrzeuge für das verkehrstelematische System ausgewählt wird, und sich x in Abhängigkeit der Ausstattungsrate berechnet, ändert es sich mit jeder Ausstattungsrate. Damit hat nicht nur die Zufallsstartzahl Einfluss auf die Verteilung der einfahrenden Fahrzeuge, sondern auch die Ausstattungsrate. Dieser Umstand könnte dazu führen, dass der Einfluss der Zufallsstartzahl bei verschiedenen Ausstattungsrate unterschiedlich ausfällt. Zur Sicherstellung dieser ersten Analyse müssten jedoch weitere, nicht mehr im vorliegenden Datenmaterial enthaltene Messreihen aufgenommen werden.

Der Kurvenverlauf der Erkennungsrate mit seinem frühen Maximum und der darauf folgenden Abflachung sollte zusammen mit der Falschalarmrate betrachtet werden und wird dort weiter erläutert.

Für die **durchschnittliche Falschalarmrate** wurden, getrennt nach Level of Service, die nachstehenden Ergebnisse für die Minima und Maxima erzielt:

	Minimum	Maximum
LoS B	0,713 (1%)	0,822 (85%)
LoS C	0,748 (3%)	0,849 (89%)
LoS D	0,837 (5%)	0,911 (85%)
LoS E	0,923 (7%)	0,947 (85%)
LoS F	0,066 (85%)	0,291 (3%)

Die minimalen Werte ergaben sich für LoS B bis LoS E bei Ausstattungsraten zwischen 1% und 7%. Der weitere Verlauf der Kurven in Richtung höherer Ausstattungsraten für diese Level of Service zeigte einen Sättigungsverlauf ansteigend hin zum jeweiligen Maximum, das bei Ausstattungsraten von 85% bis 89% erreicht wurde. Sowohl die Minima als auch die Maxima lagen auf hohem Niveau zwischen 0,713 und 0,947.

Für den LoS F wurden hingegen gänzlich andersartige Daten aufgezeichnet. Das Maximum wurde hier bei einer Ausstattungsrate von 3% erzielt, danach zeigte sich kein steigender, sondern ein fallender Verlauf, der sich ab 25% Ausstattungsrate etwa dem Niveau des Minimums angenähert hat. Das Minimum wurde bei einer Ausstattungsrate von 85% erreicht. Auch bezüglich der Höhe der durchschnittlichen Falschalarmrate gab es deutliche Unterschiede zu den anderen LoS. Das Maximum von 0,291 des LoS F lag um Größenordnungen unter dem Minimum aller anderen LoS von 0,713 (LoS B). Das Minimum war mit 0,066 der niedrigste erzielte Wert aller Level of Service.

Da niedrige Falschalarmraten das bessere Ergebnis darstellen, waren die Messwerte für den LoS F im Vergleich zu den anderen Level of Service die besseren. Dies deckte sich mit den Erkenntnissen bezüglich der Erkennungsrate des LoS F. Für die durchschnittliche Falschalarmrate bedeutete dies, dass im Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren für den LoS F im schlechtesten Fall 29,1% der räumlich-zeitlichen Ausdehnung seiner rekonstruierten Verkehrsinformationen nicht mit tatsächlich vorkommenden Verkehrseignissen übereinstimmten. Mit zunehmender Ausstattungsrate sank dieser Wert erwartungsgemäß und auf ein niedriges Niveau von nur 6,6%.

Für die verbleibenden Ergebnisse der LoS B bis LoS E zeigt sich ein zunächst nicht-erwartungskonformes Verhalten: mit steigender Ausstattungsrate sank die durchschnittliche Falschalarmrate nicht, sondern sie stieg an. Zusätzlich zeigte das Niveau der Werte, dass es für keinen dieser Level of Service möglich war, eine kleinere Falschalarmrate als 0,713 anzunehmen, was bedeutet, dass mehr als 71% der räumlich-zeitlichen Ausdehnung der rekonstruierten Verkehrsinformation nicht mit den tatsächlichen Verkehrsinformationen übereinstimmte. Als Erklärung kann hier angeführt werden, dass das Verfahren für diese Level of Service nicht zuverlässig arbeitete und so umso mehr falsche oder teilweise falsche Verkehrsinformationen rekonstruiert wurden, je mehr Fahrzeuge am verkehrstelematischen System teilnahmen. Stellte

man dies den Ergebnissen des LoS F gegenüber, so konnte damit der Verlauf der Erkennungsrate erklärt werden. Dass das Verfahren prinzipiell die Verkehrslage rekonstruieren kann, wurde durch die Erkennungsrate für den LoS F deutlich. Ebenso zeigten die Daten der Erkennungsrate des LoS F, dass dies bereits für die geringe Ausstattungsrate von 1% galt, also bereits bei niedrigen Ausstattungsraten signifikante Ergebnisse erzielt werden konnten. Aus den schlechten Ergebnissen der Falschalarmrate für LoS B bis LoS E wurde ersichtlich, dass das Verfahren für diese Level of Service nicht zuverlässig arbeitete. Da es aber dasselbe Verfahren ist, das für den LoS F zur Anwendung kam, war zu erwarten, dass auch die Erkennungsrate des LoS F diesem verschlechternden Einfluss unterlag. In Kombination mit den von geringen Ausstattungsraten an guten und mit steigender Ausstattungsrate steigenden Werten der Erkennungsrate konnte dies den Verlauf der Erkennungsrate erklären, der nach anfänglicher Steigung bei der Ausstattungsrate von 9% das Maximum erreichte, um dann bei weiter zunehmender Ausstattungsrate nicht weiter zu wachsen, sondern unter dem verschlechternden Einfluss wieder zu sinken und dann langsam abzuflachen.

Bezüglich der **durchschnittlichen zeitlichen Genauigkeit** konnten folgende Minima und Maxima für die einzelnen Level of Service ermittelt werden:

	Minimum	Maximum
LoS B	0,967 (1%)	0,991 (> 11%)
LoS C	0,958 (1%)	0,991 (> 9%)
LoS D	0,961 (1%)	0,991 (> 65%)
LoS E	0,965 (1%)	0,990 (> 5%)
LoS F	0,940 (1%)	0,990 (> 11%)

Die Werte lagen insgesamt auf sehr hohem Niveau, Werte von 0,94 wurden selbst bei kleinen Ausstattungsraten nicht unterschritten. Die Maxima wurden mehrfach erreicht, was daran lag, dass die Werte für alle Level of Service ab etwa 5% bis 11% das Niveau des Maximums erreichten und dann in einem Bereich von etwa 0,01 um diesen Wert schwankten.

Die hohen Werte der zeitlichen Genauigkeit gaben Aufschluss darüber, dass das Verfahren sehr schnell arbeitete und bereits ab Ausstattungsrate von 5% bis 11% in zeitlicher Hinsicht zu 99% genau war.

Die **durchschnittliche räumliche Genauigkeit** erzielte für die verschiedenen Level of Service nachstehende minimale und maximale Werte:

	Minimum	Maximum
LoS B	0,018 (1%)	0,174 (89%)
LoS C	0,020 (1%)	0,157 (85%)
LoS D	0,007 (1%)	0,077 (89%)
LoS E	0,006 (1%)	0,042 (89%)
LoS F	0,042 (1%)	0,168 (89%)

Für alle Level of Service war das Minimum bei der Ausstattungsrate von 1%, die Maxima wurden bei der höchsten Ausstattungsrate von 89% erreicht. Das Anfangsniveau war für alle Level of Service relativ niedrig, für LoS F war sie jedoch mit 0,042 im Vergleich deutlich höher als für die

anderen Level of Service. Als höchster Wert wurde 0,174 erzielt (LoS B), dicht gefolgt von LoS F mit 0,168.

Die für alle Level of Service einschließlich des LoS F relativ niedrigen Werte bedeuten, dass das Verfahren die Verkehrsinformationen im besten Fall räumlich auf 17,4% genau rekonstruieren konnte. Das insgesamt niedrige Niveau dieser Werte stützte damit die bei der Falschalarmrate gemachte Aussage, dass der verschlechternde Einfluss für alle Level of Service zum Tragen kam, indem eine Begründung geliefert wurde: die räumliche Genauigkeit war nicht hoch genug.

4.5.1.4 Qualitätskennzahlen Frequenzdomänenverfahren, zentrale Kommunikation

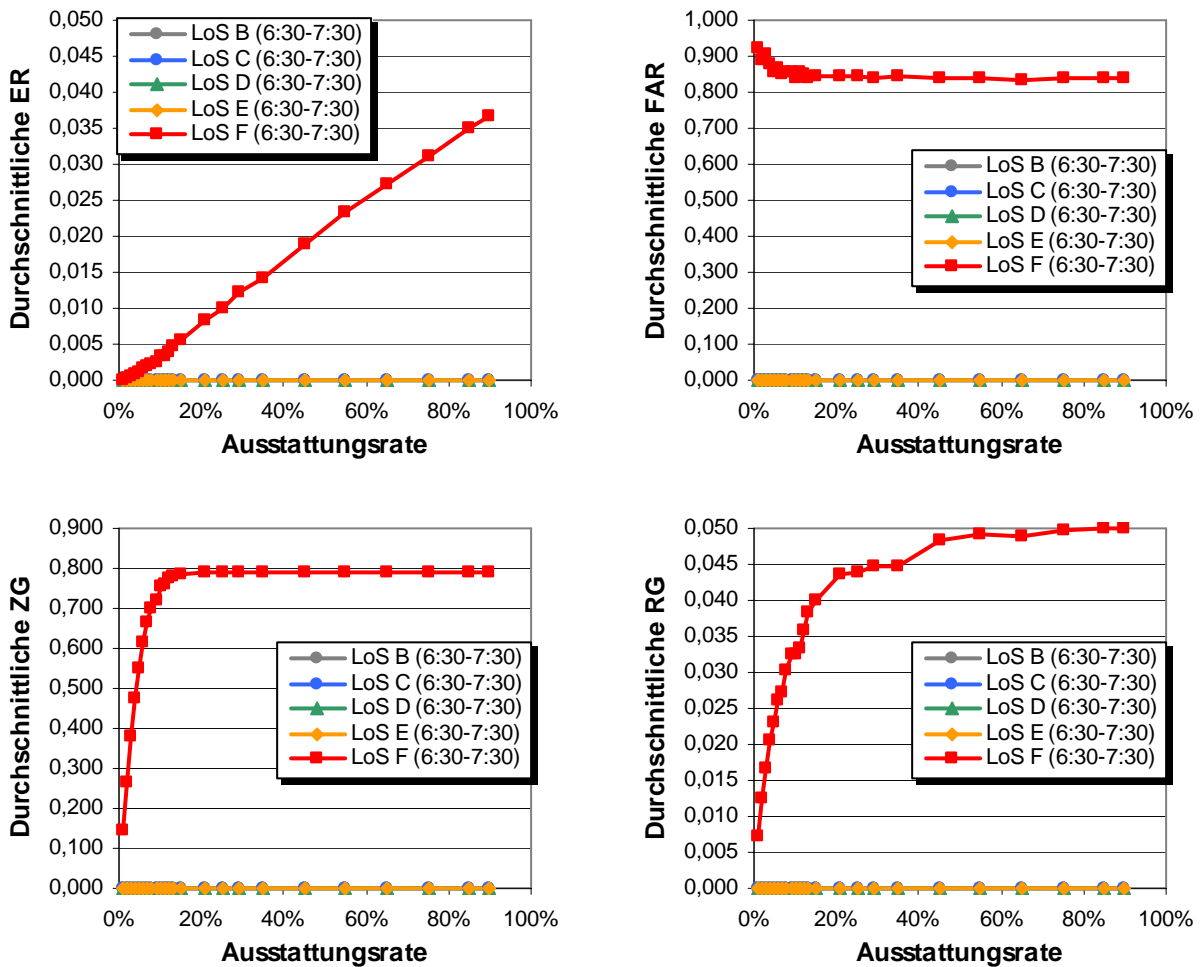


Abbildung 36: Qualitätskennzahlen der Szenarioklasse Frequenzdomänenverfahren im zentralen Kommunikationsfall für die Verkehrsnachfrage von 6:30 Uhr bis 7:30 Uhr

Abbildung 36 zeigt die Qualitätskennzahlen des Frequenzdomänenverfahrens mit zentraler Kommunikation für die Verkehrsnachfrage von 6:30 Uhr bis 7:30 Uhr. Als Simulationsdauer wurde eine Stunde verwendet, die Zufallsstartzahl war 3598 und das Abtastintervall 1 Sekunde. Da das Frequenzdomänenverfahren auf Störungsflanken basiert, arbeitet es ausschließlich mit dem LoS F. Die Werte aller Qualitätskennzahlen der anderen Level of Service sind demnach alle Null. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird daher im Folgenden auf die Nennung des LoS F bei den Qualitätskennzahlen verzichtet, da sich alle auf den LoS F beziehen.

Die **durchschnittliche Erkennungsrate** betrug maximal 0,037 bei einer Ausstattungsrate von 90%. Im Minimum bei der Ausstattungsrate von 1% betrug sie Null. Sie zeigte einen fast linearen Anstieg mit steigender Ausstattungsrate bis hin zum Maximum. Das bedeutet, dass das Frequenzdomänenverfahren im besten Fall 3,7% Überdeckung seiner rekonstruierten Verkehrsinformationen mit dem tatsächlichen Verkehrsgeschehen erreichen konnte. In anderen Worten war das Verfahren für das innerstädtische Verkehrsnetz in der vorliegenden Form noch sehr stark überarbeitungsbedürftig. Aus diesem Grund werden die anderen Qualitätskennzahlen im Folgenden nur mehr kurz diskutiert.

Die **durchschnittliche Falschalarmrate** bestätigte die Erkenntnisse der Erkennungsrate, sie zeigte zwar den erwarteten, fallenden Verlauf mit einem Maximum von 0,923 bei der Ausstattungsrate 1%, unterschritt aber bei keiner Ausstattungsrate 0,836. Das bedeutet, dass im besten Fall 83,6% der räumlich-zeitlichen Ausdehnung der rekonstruierten Verkehrsinformation keine Übereinstimmung mit den tatsächlichen Verkehrseignissen fand.

Die **durchschnittliche zeitliche Genauigkeit** nahm nach einem Minimum von 0,144 bei Ausstattungsrate 1% ab einer Ausstattungsrate von etwa 15% den Maximalwert von 0,79 an, sie war damit auf gutem Niveau.

Die **durchschnittliche räumliche Genauigkeit** wies für die Ausstattungsrate von 1% das Minimum von 0,007 aus, zeigte dann einen Sättigungsverlauf bis zum Maximum von 0,05 bei der Ausstattungsrate von 90%. Diese lag damit auf niedrigem Niveau, was die geringen Erkennungsraten erklären konnte. Da das Frequenzdomänenverfahren ein positionsgenaues Verfahren darstellt, wären für die räumliche Genauigkeit höhere Werte angemessen gewesen. Als Grund für die schlechten Ergebnisse kann nochmals das innerstädtische Verkehrsnetz angeführt werden: da das Verfahren zwar auch für städtische Netze konzipiert wurde, im Schwerpunkt jedoch auf Autobahnnetze ausgelegt war, konnte damit nachgewiesen werden, dass derjenige Teil des Verfahrens, der die innerstädtischen Begebenheiten mitberücksichtigen sollte, noch stark überarbeitungsbedürftig ist. Optimierungen dieser Art könnten dann in erneuten Messdurchgängen validiert werden.

4.5.1.5 Qualitätskennzahlen Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren über WLAN

Für das Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren mit dezentraler Kommunikation über WLAN sind aus Abbildung 37 die zugehörigen Qualitätskennzahlen ersichtlich. Die Untersuchungen wurden für die Verkehrsnachfragen 6:30 Uhr bis 7:30 Uhr und 7:30 Uhr bis 8:30 Uhr durchgeführt. Die besseren Ergebnisse wurden für die erste Verkehrsnachfrage erzielt, weswegen diese in diesem Abschnitt vorgestellt werden. Als Zufallsstartzahl wurde dabei 30432 gewählt, das Abtastintervall auf 1 Sekunde gesetzt und die Simulationsdauer auf 30 Minuten.

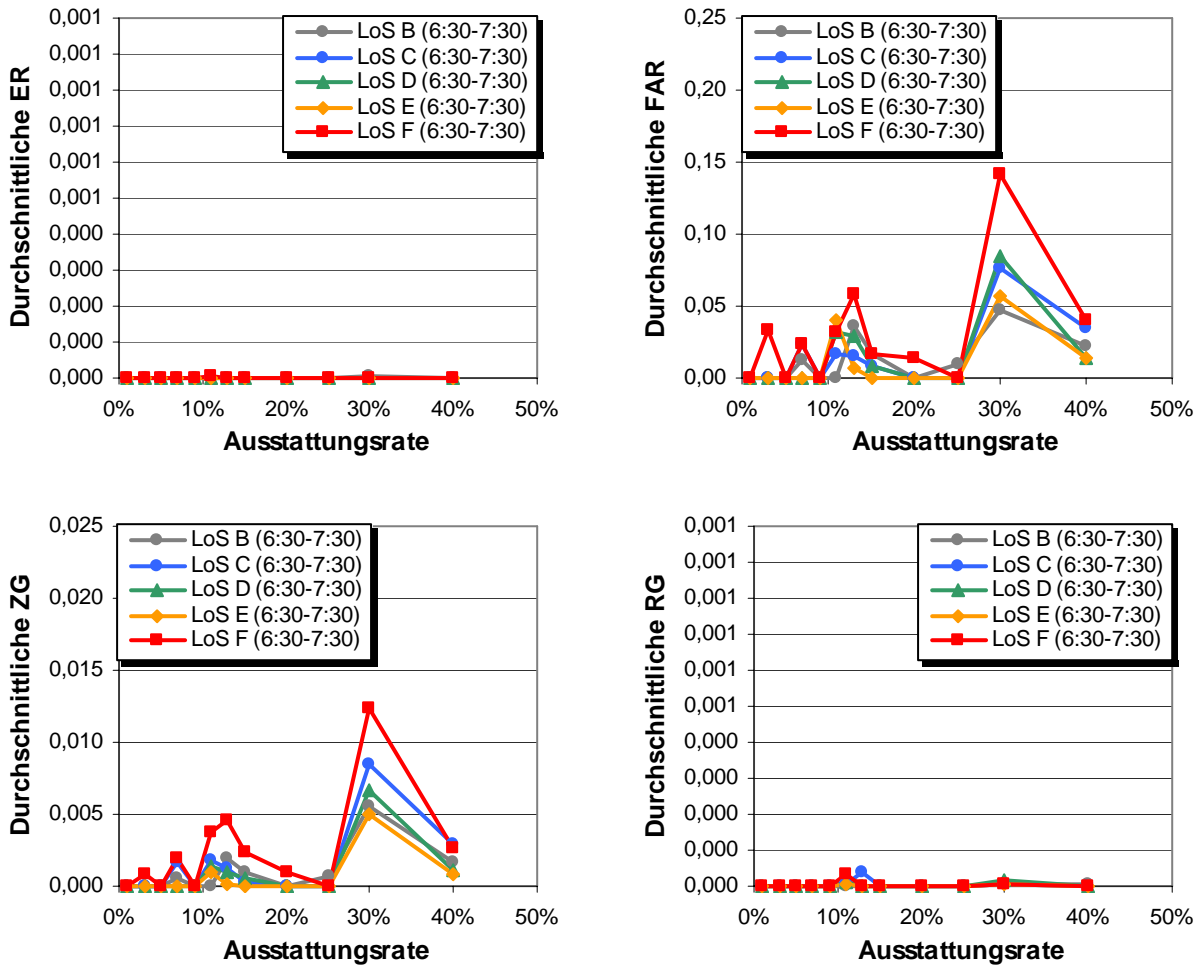


Abbildung 37: Qualitätskennzahlen der Szenarioklasse Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren im dezentralen Kommunikationsfall über WLAN, Verkehrsnachfrage von 6:30 Uhr bis 7:30 Uhr

Betrachtet man die **durchschnittliche Erkennungsrate** und die **durchschnittliche räumliche Genauigkeit**, so fällt auf, dass diese bei keiner Ausstattungsrate Ergebnisse lieferten, die bei Rundung auf drei Stellen messbar gewesen wären. Auch die **durchschnittliche zeitliche Genauigkeit** war mit maximal 0,012 sehr niedrig. Dies bedeutet, dass das Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren unter Verwendung des Konzepts der lokalen Verkehrslagen keine brauchbaren Ergebnisse generieren konnte. Dass die **durchschnittliche Falschalarmrate** dabei niedrig blieb, war dadurch von zweitrangiger Bedeutung. Aufgrund der insgesamt schlechten Ergebnisse wurde von einer weiteren Analyse dieses Sachverhalts jedoch abgesehen.

Ein weiterer Grund, warum die Ergebnisse so niedrig ausfielen, kann durch das Konzept der lokalen Verkehrslagen begründet sein. Da die Qualitätskennzahlen auf einem direkten Vergleich einer netzweiten rekonstruierten Verkehrslage mit der Referenzverkehrslage basieren, musste dies für die lokalen Verkehrslagen angepasst werden. Das geschah durch einen Vergleich jeder einzelnen lokalen Verkehrslage mit der Referenzverkehrslage und anschließender statistischer Mittelung der Ergebnisse. Als Annahme wurde dabei getroffen, dass sich durch den dezentralen Verbreitungs- und Austauschmechanismus der Fahrzeuge untereinander die Datenbasen der Fahrzeuge und damit die lokalen Verkehrslagen nur mit einer höheren zeitlichen Verzögerung

auf ein Niveau heben werden, das einem Vergleich mit der netzweiten Referenzverkehrslage standhalten kann. Weitere, nicht mehr dem vorliegenden Datenmaterial zu entnehmende Untersuchungen des Ausbreitungsverhaltens der lokalen Verkehrslagen durch Definition zusätzlicher Metriken sollte hier Klarheit verschaffen können.

4.5.1.6 Qualitätskennzahlen Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren über UTRA TDD

Die Ergebnisse der Qualitätskennzahlen dieser Szenarioklasse waren zwar geringfügig besser (für Erkennungsrate und räumliche Genauigkeit keine, die zeitliche Genauigkeit im Bereich von etwa einem Prozent und für die Falschalarmrate im Bereich weniger Prozent) als diejenigen der Szenarioklasse unter Verwendung von WLAN, jedoch auf gleichem, extrem niedrigem Niveau, sodass von weiteren Ausführungen wegen Wiederholung Abstand genommen wird.

4.5.1.7 Verkehrsnetzabdeckung

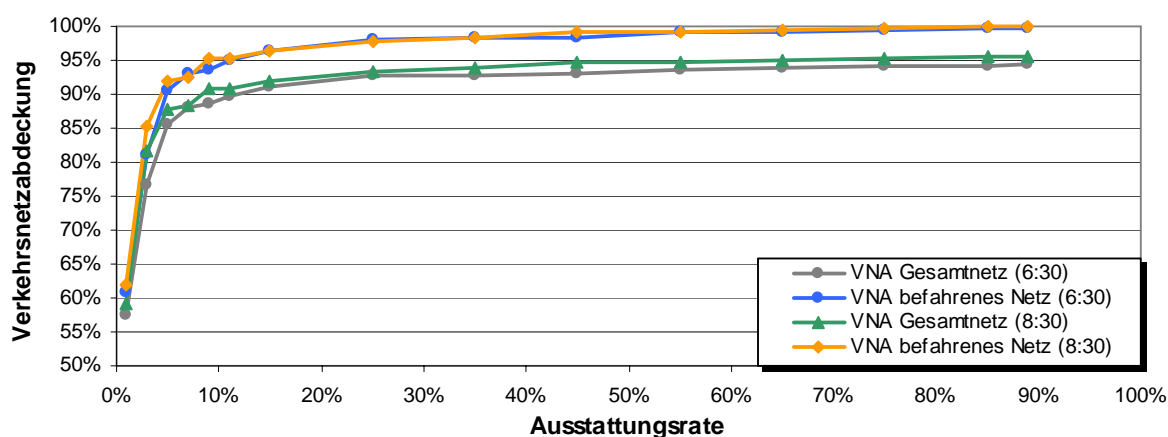


Abbildung 38: Verkehrsnetzabdeckung Gesamtnetz und befahrenes Netz in den Verkehrsnachfragen 6:30 Uhr bis 7:30 Uhr und 8:30 Uhr bis 9:30 Uhr

Die Verkehrsnetzabdeckungen in Abbildung 38 zeigt die **Verkehrsnetzabdeckung Gesamtnetz** und die **Verkehrsnetzabdeckung befahrenes Netz** für zwei Verkehrsnachfragen 6:30 Uhr bis 7:30 Uhr und 8:30 Uhr bis 9:30 Uhr. Die Verkehrsnetzabdeckung Gesamtnetz erzielte ihr Minimum von 57,6% (6:30), bzw. 59,3% (8:30) bei einer Ausstattungsrate von 1%. Sie zeigte einen Sättigungsverlauf, der sich ab einer Ausstattungsrate von etwa 25% dem Maximum von 94,3% (6:30), bzw. 95,4% (8:30) bis auf wenige Prozent angenähert hatte. Die Aussagen über den Verlauf treffen auch auf die Verkehrsnetzabdeckung befahrenes Netz zu, allerdings mit einem Minimum von 60,9% (6:30), bzw. 62% (8:30) und dem Maximum von 99,7% (6:30), bzw. 99,9% (8:30). Der Einfluss der Verkehrsnachfrage war dabei in der Größenordnung von etwa 1,5% bemerkbar, jedoch nicht groß.

Bemerkenswert war jedoch, dass die partizipierenden Fahrzeuge im Untersuchungszeitraum von einer Stunde das gesamte Verkehrsnetz bereits ab einer Ausstattungsrate von 1% mit über 57% abdeckten. Ab einer Ausstattungsrate von etwa 10% nahm die Abdeckung des Gesamtnetzes sogar schon knapp 90% an. Die maximal erreichbare Verkehrsnetzabdeckung Gesamtnetz von etwa 95% bei einer Ausstattungsrate von 89% lässt die Aussage zu, dass im verwendeten

Verkehrsnetz nicht alle Segmente von Pkws erreicht wurden, etwa 5% dieser Segmente wurden im gesamten Untersuchungszeitraum von keinem einzigen Pkw befahren. Die Werte der Verkehrsnetzabdeckung befahrenes Netz nahmen erwartungsgemäß höhere Prozentzahlen an, hier wurden bei der niedrigsten Ausstattungsrate von 1% bereits mehr als 60% der überhaupt von Pkws befahrenen Segmente von partizipierenden Fahrzeugen erreicht. Das Maximum von annähernd 100% entspricht ebenso den Erwartungen.

4.5.1.8 Kostenmengen

Für die in Abschnitt 4.4.1.3.2 genannten Kosten wurden in den Untersuchungen die Kostenmengen derart erfasst, dass für alle Anschaffungskosten und Fixkosten eine Kostenmenge von 1 aufgezeichnet wurde und für die variablen Kosten die tatsächlich für ein Szenario angefallenen Kostenmengen. Da aus den vorausgegangenen Abschnitten ersichtlich wurde, dass nur für das Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren im zentralen Kommunikationsfall gute Ergebnisse erzielt wurden, beschränkt sich die Darstellung der Kostenmengen auf diese Szenarioklasse. Als Konsequenz waren sämtliche Kostenmengen, die sich auf den dezentralen Kommunikationsfall bezogen gleich Null, ebenso Kostenmengen, die einen fahrzeugseitigen Empfang oder einen zentralseitigen Versand von Nachrichten berücksichtigten. Die verbleibenden Kostenmengen der variablen Kosten werden im Folgenden genannt.

4.5.1.8.1 Kostenmenge fahrzeugseitige Menge zentral versendeter Nachrichten

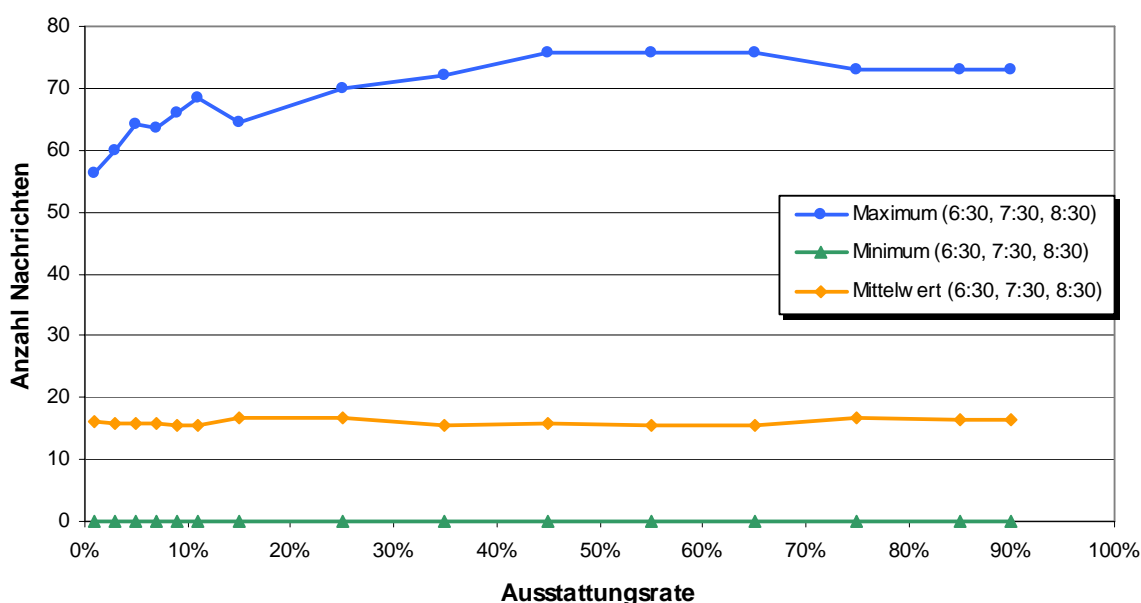


Abbildung 39: Kostenmenge fahrzeugseitige Menge zentral versendeter Nachrichten gemittelt über die Verkehrsnachfragen von 6:30 Uhr bis 7:30 Uhr, von 7:30 Uhr bis 8:30 Uhr und von 8:30 Uhr bis 9:30 Uhr

Jedes partizipierende Fahrzeug wurde mit der Kostenmenge fahrzeugseitige Menge zentral versendeter Nachrichten beaufschlagt. Da sich die Menge der Nachrichten von Fahrzeug zu Fahrzeug unterschied, wurde die Anzahl der Nachrichten statistisch gemittelt mit Minimum, Maximum und Durchschnittswert aufgezeichnet. Derart erzeugte Werte lagen für alle drei

Verkehrsnachfragen vor und wurden in Abbildung 39 gemittelt über diese drei Verkehrsnachfragen dargestellt. Beim Minimum fiel auf, dass es während der gesamten Simulationsdauer mindestens ein Fahrzeug gab, das keine einzige Meldung versendete. Im Mittel versendeten die Fahrzeuge etwa 16 Nachrichten an die Zentrale, dieser Wert stellte sich unabhängig von der Ausstattungsrate ein. Das Maximum der versendeten Nachrichten zeigte einen leicht steigenden Verlauf hin zu höheren Ausstattungsraten und nahm maximal den Wert von etwa 75 Nachrichten an.

4.5.1.8.2 Kostenmengen von versendeten, übertragenen und empfangenen Nachrichten

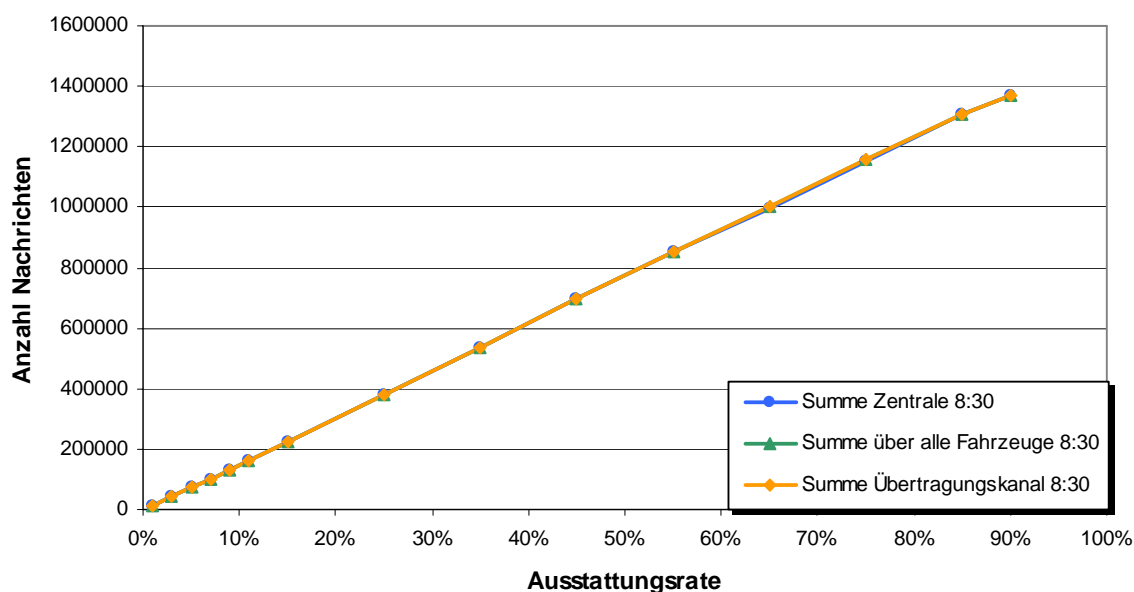


Abbildung 40: Kostenmenge Summe fahrzeugseitige Menge zentral versendeter Nachrichten, Kostenmenge zentralseitige Menge empfangener Nachrichten und Kostenmenge Menge übertragener Nachrichten im Vergleich für die Verkehrsnachfrage von 8:30 Uhr bis 9:30 Uhr

Neben den statistisch gemittelten Werten der fahrzeugseitigen Menge zentral versendeter Nachrichten wurde auch ihre Summe über alle Fahrzeuge ermittelt. Diese Summe konnte damit der Menge der über den Übertragungskanal übertragenen Nachrichten gegenübergestellt werden und ebenso der von der Zentrale empfangenen Menge von Nachrichten. Wie Abbildung 40 für die Werte der Verkehrsnachfrage von 8:30 Uhr bis 9:30 Uhr zeigt, war die Summe der versendeten, übertragenen und empfangenen Nachrichten jeweils etwa deckungsgleich. Dies lag daran, dass in den vorliegenden Untersuchungen die Verlustrate von Nachrichten auf 0% gesetzt wurde. Je höher die Verlustrate, desto mehr würden diese Kurven auseinanderklaffen.

Der Verlauf der Kurve ist linear, also steigt die Kommunikation direkt proportional zur Ausstattungsrate. Der Maximalwert aller im System bewegten Nachrichten innerhalb der Simulationsdauer von einer Stunde war mit etwas mehr als 1,37 Millionen Nachrichten exorbitant hoch, was den Umstand widerspiegelt, dass das Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren das gemeinsame Prinzip dreier Floating Car Data Verfahren umsetzt, jedoch keinerlei Kostenoptimierung enthält.

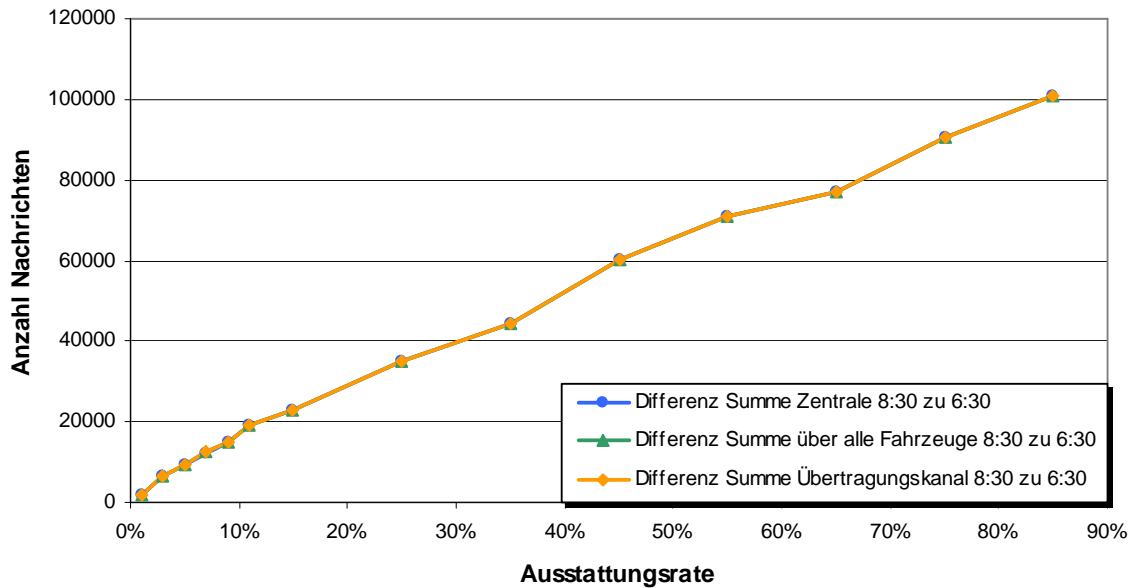


Abbildung 41: Differenz der Nachrichtensummen in den Verkehrsnachfragen 6:30 Uhr bis 7:30 Uhr und 8:30 Uhr bis 9:30 Uhr

Da in Abbildung 40 die Nachrichtensummen nur für die Verkehrsnachfrage von 8:30 Uhr bis 9:30 Uhr dargestellt war, zeigt Abbildung 41 die Differenz dieser Summen zu den Werten, die für die Verkehrsnachfrage von 6:30 Uhr bis 7:30 Uhr erreicht wurden. Es zeigte sich ein deutlicher Unterschied, der einfach dadurch erklärbar war, dass eine höhere Verkehrsnachfrage bei gleicher Ausstattungsrate eine höhere Anzahl an partizipierenden Fahrzeugen bewirkt, die die Summe der Nachrichten erhöhen. Die maximale Differenz der Nachrichtensummen war durch etwas mehr als 101000 Nachrichten gegeben.

4.5.2 Sensitivitätsanalysen

Die Ergebnisse der in Abschnitt 4.4.1.2 festgelegten Sensitivitätsanalysen werden in diesem Abschnitt präsentiert und dienen der Zuverlässigkeitsprüfung. Dazu wurden für jede Sensitivitätsanalyse die betrachteten Messgrößen genannt, anhand derer die Einflüsse der jeweiligen Sensitivitätsanalyse untersucht werden konnten. Meist wurde die Schwankung in Form der Standardabweichung berechnet, je kleiner die Standardabweichung dabei war, desto unabhängiger waren die Messergebnisse von der Größe, die Gegenstand der jeweiligen Sensitivitätsanalyse ist. Als Verfahren kam in allen Fällen das Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren im zentralen Kommunikationsfall zum Einsatz.

4.5.2.1 Zufallsstartzahl

Für die Sensitivitätsanalyse Zufallsstartzahl wurden die gleichen Untersuchungen für drei verschiedene Zufallsstartzahlen (6793, 16844 und 30432) und zwei verschiedene Verkehrsnachfragen (6:30 Uhr bis 6:45 Uhr und 8:30 bis 8:45 Uhr) durchgeführt. Als Ergebnis lagen für jede der in Abschnitt 4.4.1.3 definierten Metriken Messwerte vor. Pro Verkehrsnachfrage wurden dann die resultierenden drei Messreihen der verschiedenen

Zufallsstartzahlen statistisch gemittelt und die Standardabweichung berechnet. Dies wurde für folgende Metriken vorgenommen:

- Durchschnittliche Erkennungsrate Level of Service B bis F
- Durchschnittliche Falschalarmrate Level of Service B bis F
- Durchschnittliche zeitliche Genauigkeit Level of Service B bis F
- Durchschnittliche räumliche Genauigkeit Level of Service B bis F

Die Standardabweichung jeder einzelnen Metrik wurde für jede Ausstattungsrate getrennt berechnet, sodass für die Analyse pro Metrik und pro Verkehrsnachfrage die Standardabweichung in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate betrachtet werden kann.

4.5.2.1.1 Standardabweichungen der durchschnittlichen Erkennungsrate

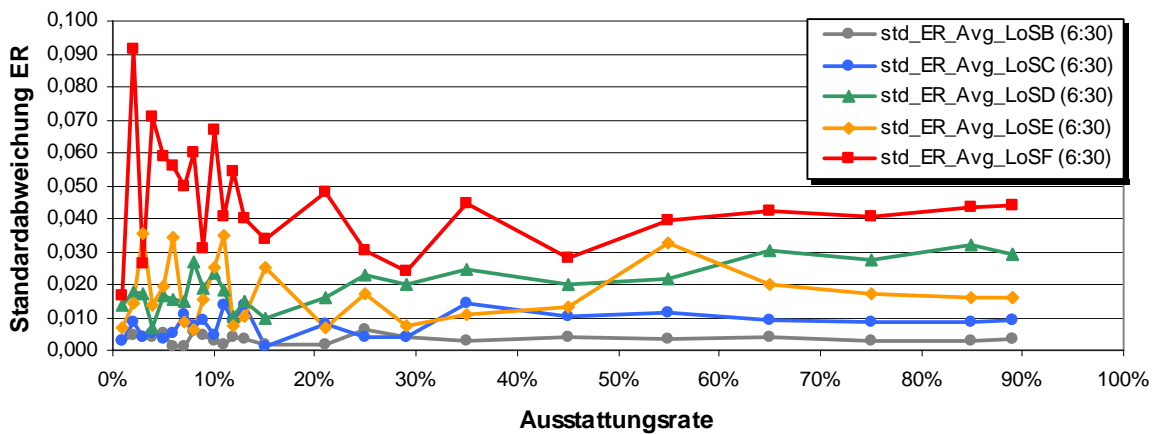


Abbildung 42: Standardabweichungen der durchschnittlichen Erkennungsrate in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate für die Verkehrsnachfrage von 6:30 Uhr bis 6:45 Uhr

Über alle Level of Service und Ausstattungsraten lag die Standardabweichung der durchschnittlichen Erkennungsrate für die Verkehrsnachfrage von 6:30 bis 6:45 Uhr in einem Bereich von 0,001 bis 0,091. Da die Erkennungsrate – wie jede Qualitätskennzahl – minimal 0 und maximal 1 annehmen kann, lag die Schwankung in Abhängigkeit von der Zufallsstartzahl zwischen 0,1% und 9,1%. Die ebenfalls über alle Level of Service und Ausstattungsraten durchschnittliche Schwankung betrug dabei 1,9%. Aufgeschlüsselt nach Level of Service nahm diese durchschnittliche (in Klammer jeweils zusätzlich die minimale und maximale) Schwankung über alle Ausstattungsraten für

- LoS B 0,3% (0,1% - 0,6%),
- LoS C 0,8% (0,1% - 1,4%),
- LoS D 2% (0,7% - 3,2%),
- LoS E 1,7% (0,6% - 3,6%),
- LoS F 4,5% (1,7% - 9,1%)

an. Vergleicht man diese durchschnittlichen Schwankungswerte mit den einzelnen Kurvenverläufen, so fällt auf, dass sich mit Ausnahme von Level of Service D die Schwankungen aller Level of Service bei hohen Ausstattungsraten ab ca. 65% ungefähr auf diesem durchschnittlichen Schwankungswert einpendelten, LoS D wich in dieser Darstellung um ca. 1%

ab. Insgesamt blieben die Schwankungen über die Ausstattungsrate gesehen daher im Mittel etwa gleich. Im Detail zeigten sich jedoch starke Schwankungen bei niedrigen Ausstattungsraten bis etwa 15%, die sich mit zunehmender Ausstattungsrate glätteten.

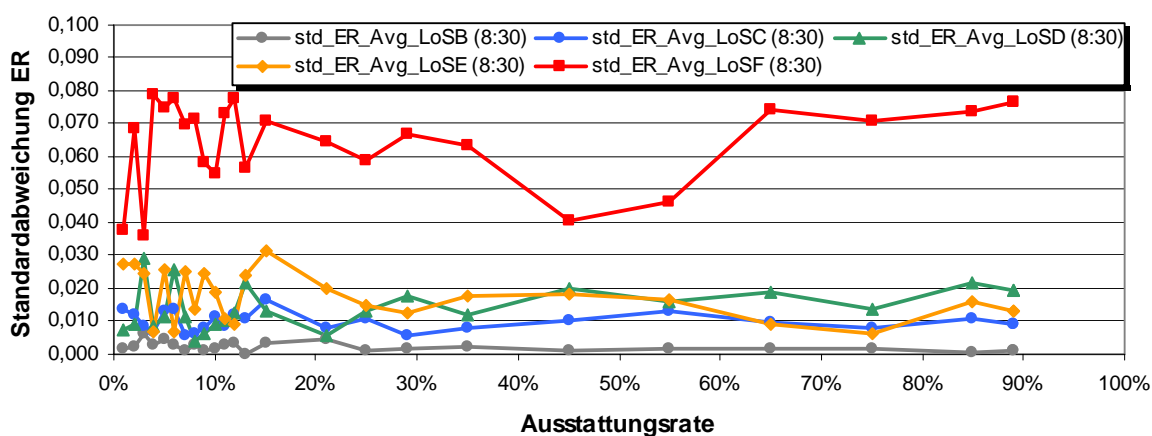


Abbildung 43: Standardabweichungen der durchschnittlichen Erkennungsrate in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate für die Verkehrsnachfrage von 8:30 Uhr bis 8:45 Uhr

Für die Verkehrsnachfrage von 8:30 bis 8:45 betrug über alle Level of Service und Ausstattungsraten der Bereich der Standardabweichungen 0% - 7,9% mit einem Mittelwert bei 2,2%. Getrennt nach Level of Service ergaben sich folgende Mittelwerte, in Klammer sind wieder die Minima und Maxima genannt:

LoS B	0,2%	(0% - 0,6%)
LoS C	1%	(0,6% - 1,7%)
LoS D	1,4%	(0,4% - 2,9%),
LoS E	1,7%	(0,6% - 3,2%)
LoS F	6,5%	(3,6% - 7,9%)

Die Trends der verschiedenen Level of Service waren dabei, gemessen an den jeweiligen Mittelwerten, relativ konstant, für LoS D und LoS F mit geringfügiger Abweichung im Bereich 0,5-1% bei hohen Ausstattungsraten. Der Verlauf der einzelnen Kurven zeigt erhöhte Unruhe bis etwa 15%, die zu höheren Ausstattungsraten hin deutlich abnimmt.

Vergleicht man die Ergebnisse der beiden Verkehrsnachfragen, so war der Verlauf über die Ausstattungsrate ähnlich ausgeprägt und bis auf LoS F auf niedrigem Niveau, das im Mittel bis 2% (LoS D bei 6:30 Uhr – 6:45 Uhr) reicht. Die Schwankungen bei niedrigen Ausstattungsraten traten in beiden Fällen auf, stärker jedoch im ersten Fall. Bei niedrigen Ausstattungsraten waren die Ergebnisse demnach in höherem Maß von der Wahl der Zufallsstartzahl abhängig als bei größeren Ausstattungsraten. Anders ausgedrückt wurde die Schwankung der Standardabweichungen mit zunehmender Anzahl an partizipierenden Fahrzeugen geringer. Da die Verkehrsnachfrage im Fall 8:30 Uhr – 8:45 Uhr deutlich höher war als im ersten Fall, entsprachen den gleichen Ausstattungsraten absolut gemessen mehr partizipierende Fahrzeuge, womit erklärt werden kann, warum die Schwankungen der Standardabweichungen im zweiten Fall weniger deutlich ausgeprägt waren. Die höheren Schwankungen im niedrigen Bereich lassen sich durch die Auswirkungen der Zufallsstartzahl erklären: da jede Zufallsstartzahl die Fahrzeuge im Verkehrsnetz anders verteilt und das Auswahlverfahren von partizipierenden Fahrzeugen

jedes x -te Fahrzeug auswählt, kommt es in Abhängigkeit der Zufallsstartzahl zu unterschiedlichen räumlichen Verteilungen der partizipierenden Fahrzeuge. Änderungen in der Ausstattungsrate führen zu einer Veränderung von x und damit kann selbst bei einer Erhöhung um nur 1% das Ergebnis deutlich anders ausfallen. Bei höheren Ausstattungsraten stehen mehr Fahrzeuge und damit eine gleichmäßigere räumliche Abdeckung und Verteilung zur Verfügung, sodass sich der Effekt zunehmend nivelliert.

Des Weiteren fällt auf, dass die Standardabweichung des LoS F in beiden Fällen etwas höher als die der anderen Level of Service lag. Da das Niveau der Standardabweichungen jedoch noch als niedrig eingestuft wurde, erfolgten keine weiteren Untersuchungen der Ursachen. Als plausibel erscheinende Erklärung kann jedoch genannt werden, dass der LoS F den instabilen Bereich des Verkehrsflusses kennzeichnet, höhere Schwankungen in diesem Bereich also eigentlich sogar zu erwarten sind.

Insgesamt betrachtet lag die Stabilität der Erkennungsrate gegenüber Veränderungen der Zufallsstartzahl über alle Werte beider Fälle bei 2,1%, was als gut eingestuft werden kann. Es war jedoch bei niedrigen Ausstattungsraten eine stärkere Abhängigkeit festzustellen. Diese kann – wie bei stochastischen Simulationen üblich – durch mehrere Messdurchläufe mit unterschiedlichen Zufallsstartzahlen wieder ausgeglichen werden. Des Weiteren wies der LoS F mit 5,5% über beide Fälle etwas höhere Standardabweichungen auf, sodass auch hier die Anzahl der Messdurchläufe erhöht werden sollte.

4.5.2.1.2 Standardabweichungen der durchschnittlichen Falschalarmrate

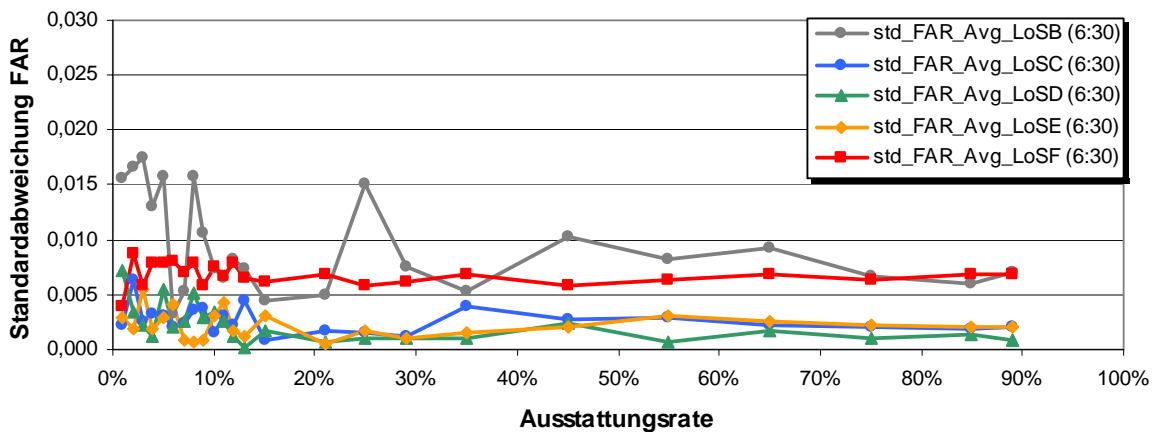


Abbildung 44: Standardabweichungen der durchschnittlichen Falschalarmrate in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate für die Verkehrsnachfrage von 6:30 Uhr bis 6:45 Uhr

Die Standardabweichungen der durchschnittlichen Falschalarmrate für die Verkehrsnachfrage von 6:30 Uhr bis 6:45 Uhr bewegte sich über alle Level of Service und Ausstattungsraten zwischen 0% und 1,8%. Die durchschnittliche Standardabweichung nahm dabei 0,5% an.

Der Mittelwert (inklusive Minimum und Maximum), getrennt nach Level of Service, nahm dabei folgende Werte an:

LoS B 0,9%	(0,3% - 1,8%)
LoS C 0,3%	(0,1% - 0,6%)
LoS D 0,2%	(0% - 0,7%),
LoS E 0,2%	(0% - 0,6%)
LoS F 0,7%	(0,4% - 0,9%)

Bezüglich des Kurvenverlaufs zeigten sich ähnliche Charakteristika wie bei der Erkennungsrate.

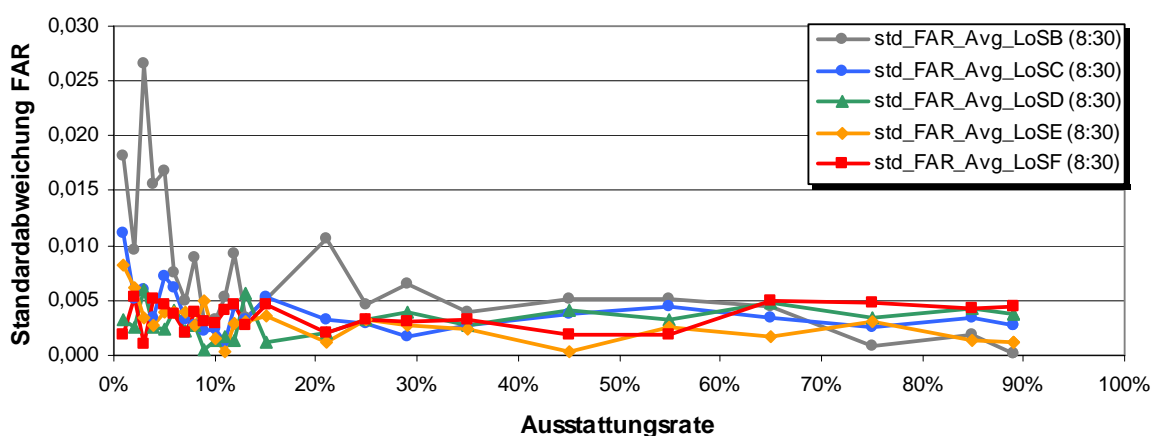


Abbildung 45: Standardabweichungen der durchschnittlichen Falschalarmrate in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate für die Verkehrsnachfrage von 8:30 Uhr bis 8:45 Uhr

Im Rahmen der Verkehrsnachfrage von 8:30 Uhr bis 8:45 Uhr wurden über alle Level of Service und Ausstattungsraten Standardabweichungen von minimal 0% und maximal 2,7% bei einem Mittelwert bei 0,4% erzielt. Aufgeschlüsselt nach Level of Service ergaben sich diese Mittelwerte (inklusive Minima und Maxima):

LoS B 0,7%	(0% - 2,7%)
LoS C 0,4%	(0,1% - 1,1%)
LoS D 0,3%	(0,1% - 0,6%),
LoS E 0,3%	(0% - 0,8%)
LoS F 0,4%	(0,1% - 0,5%)

Außer LoS B zeigte sich ein konstanter Trend mit den bereits für die Erkennungsrate genannten Charakteristika. Für LoS B blieben zwar die Charakteristika die gleichen, es zeigte sich jedoch ein leicht fallender Trend.

Im Vergleich der beiden Fälle kann festgehalten werden, dass die Robustheit der Falschalarmrate gegenüber den Einflüssen der Zufallsstartzahl mit einer über beide Fälle gemittelten, sehr niedrigen Standardabweichung von 0,45% als sehr gut eingestuft werden kann. Der leicht fallende Trend im zweiten Fall für LoS B kann aufgrund des sehr niedrigen mittleren Niveaus von 0,7% zwar als statistisches Rauschen interpretiert werden, aber auch durch die steigende Datendichte bei höheren Ausstattungsraten und die damit verbundene zunehmende Unempfindlichkeit gegenüber den Einflüssen der Zufallsstartzahl erklärt werden.

4.5.2.1.3 Standardabweichungen der durchschnittlichen zeitlichen Genauigkeit

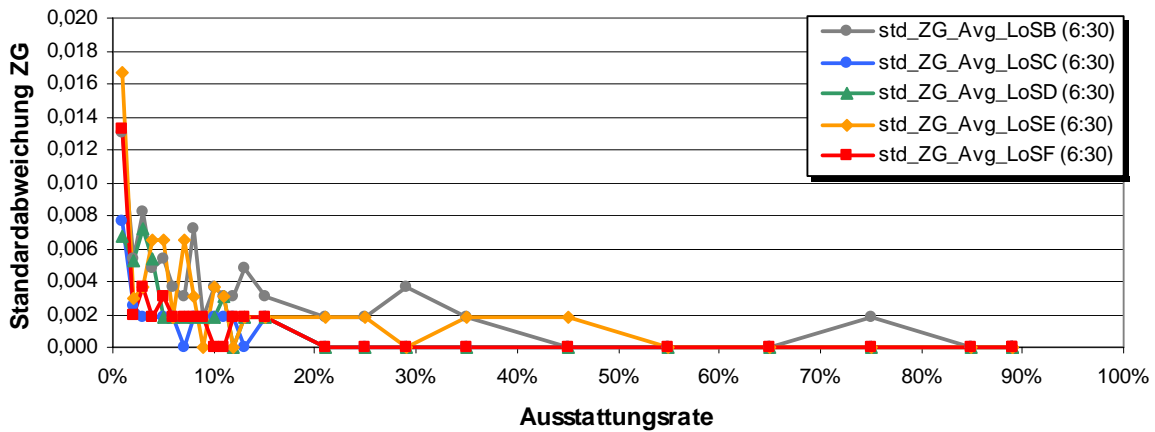


Abbildung 46: Standardabweichung der durchschnittlichen zeitlichen Genauigkeit in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate für die Verkehrsnachfrage von 6:30 Uhr bis 6:45 Uhr

Über alle Ausstattungsraten und Level of Service lagen die für die Verkehrsnachfrage 6:30 Uhr bis 6:45 Uhr ermittelten Standardabweichungen zwischen 0% und 1,7% bei einer mittleren Standardabweichung von 0,2%. Die Werte der einzelnen Level of Service waren dabei:

- LoS B 0,3% (0% - 1,3%)
- LoS C 0,1% (0% - 0,8%)
- LoS D 0,2% (0% - 0,7%),
- LoS E 0,3% (0% - 1,7%)
- LoS F 0,1% (0% - 1,3%)

Da sich die Standardabweichungen bis auf zwei geringfügig höhere Werte bei der Ausstattungsrate von 1% für LoS E und LoS F unterhalb von 0,9% befanden, wurden Trendbeobachtungen zunehmend schwieriger. Sollte er dennoch angegeben werden, kann ein geringfügig fallender Trend beobachtet werden.

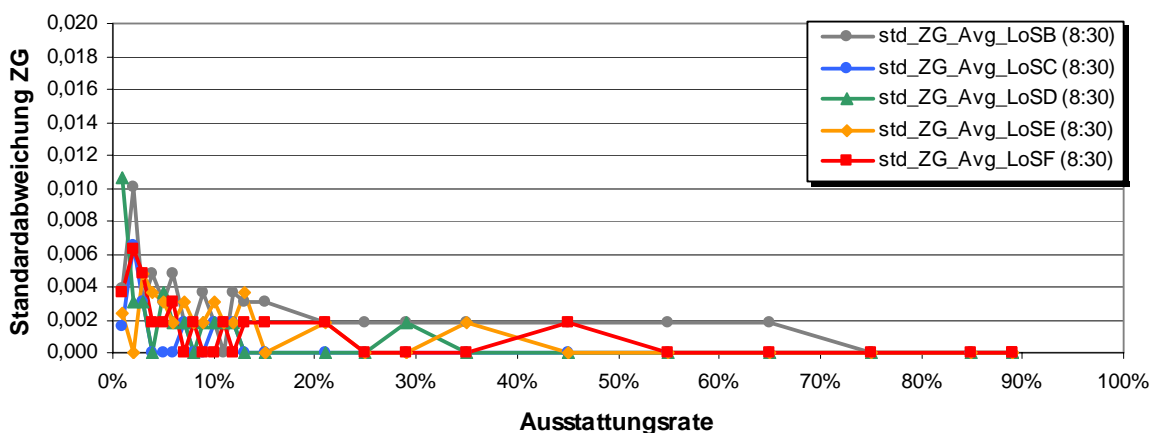


Abbildung 47: Standardabweichungen der durchschnittlichen zeitlichen Genauigkeit in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate für die Verkehrsnachfrage von 8:30 Uhr bis 8:45 Uhr

Die Standardabweichungen der zeitlichen Genauigkeit betragen für die Verkehrsnachfrage 8:30 Uhr bis 8:45 Uhr im Mittel 0,1% über alle Ausstattungsraten und Level of Service mit einem Minimum von 0% und einem Maximum von 1,1%. Getrennt nach Level of Service ergaben sich folgende Werte:

LoS B	0,2%	(0% - 1%)
LoS C	0,1%	(0% - 0,7%)
LoS D	0,1%	(0% - 1,1%),
LoS E	0,1%	(0% - 0,5%)
LoS F	0,1%	(0% - 0,6%)

Bezüglich ihres Verlaufs über die Ausstattungsrate konnten die gleichen Beobachtungen wie im Fall 6:30 Uhr – 6:45 Uhr gemacht werden.

Im Vergleich der beiden Fälle liegt die mittlere Standardabweichung bei 0,15%, was ähnlich der Falschalarmrate eine sehr gute Resistenz der zeitlichen Genauigkeit gegenüber Variationen der Zufallsstartzahl attestiert. Die Werte waren auf einem so niedrigen Niveau, dass von weiteren Analysen Abstand genommen wurde, da das statistische Rauschen als im Vordergrund stehend betrachtet wurde.

4.5.2.1.4 Standardabweichungen der durchschnittlichen räumlichen Genauigkeit

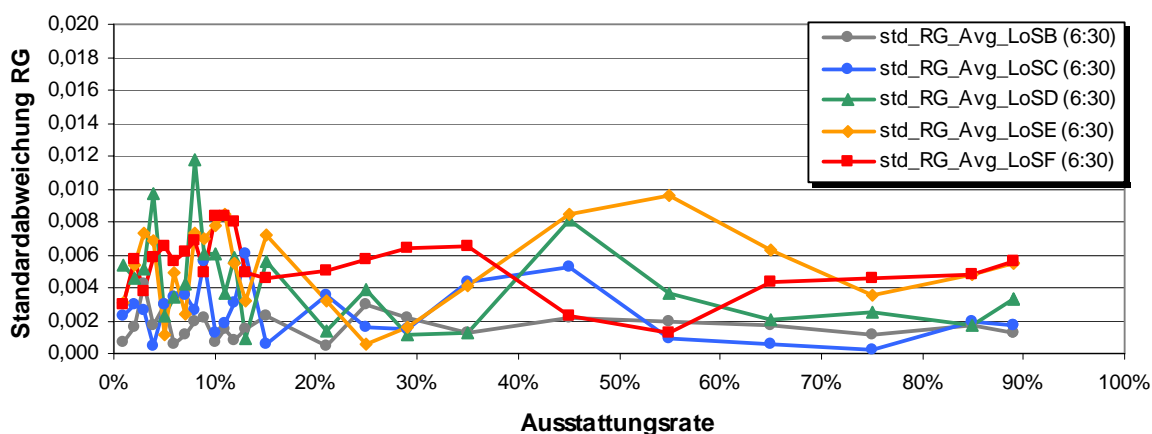


Abbildung 48: Standardabweichungen der durchschnittlichen räumlichen Genauigkeit in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate für die Verkehrsnachfrage von 6:30 Uhr bis 6:45 Uhr

Über alle Level of Service und Ausstattungsraten hinweg konnte für die mittlere Standardabweichung der räumlichen Genauigkeit für die Verkehrsnachfrage 6:30 Uhr bis 6:45 Uhr der Wert 0,4% errechnet werden, alle aufgetretenen Werte lagen dabei zwischen 0% und 1,2%. Die einzelnen Level of Service betrachtet ergaben folgendes Bild:

LoS B	0,2%	(0% - 0,4%)
LoS C	0,3%	(0% - 0,6%)
LoS D	0,4%	(0,1% - 1,2%),
LoS E	0,5%	(0,1% - 1%)
LoS F	0,5%	(0,1% - 0,8%)

Ähnlich der zeitlichen Genauigkeit waren in diesen Größenordnungen Trendbeobachtungen mit Vorsicht zu genießen, im direkten Vergleich streuten die Standardabweichungen bei der räumlichen Genauigkeit jedoch stärker und zeigten eine konstante Tendenz

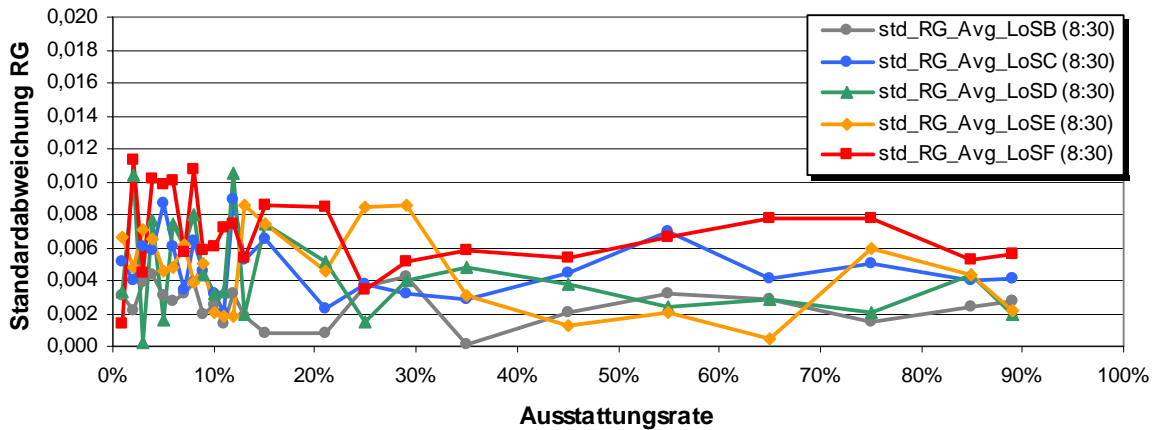


Abbildung 49: Standardabweichungen der durchschnittlichen räumlichen Genauigkeit in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate für die Verkehrsnachfrage von 8:30 Uhr bis 8:45 Uhr

Die Verkehrsnachfrage 8:30 Uhr bis 8:45 Uhr ergab als mittlere Standardabweichung über alle Level of Service und Ausstattungsraten 0,5%, mit einem Minimum von 0% und Maximum von 1,1%. Getrennt betrachtet nach Level of Service wurden diese Werte errechnet:

- LoS B 0,3% (0% - 0,4%)
- LoS C 0,5% (0,9% - 0,2%)
- LoS D 0,4% (0% - 1,1%),
- LoS E 0,5% (0% - 0,9%)
- LoS F 0,7% (0,1% - 1,1%)

Die Aussagen über den tendenziellen Verlauf könnten vom ersten Fall übernommen werden.

Werden die beiden Fälle miteinander verglichen, so wies eine durchschnittliche Standardabweichung von 0,45% zwar einen geringfügig höheren Wert auf als die der zeitlichen Genauigkeit, da dies aber immer noch ein sehr niedriger Wert ist, kann die Aussage getroffen werden, dass die räumliche Genauigkeit gegenüber den Einflüssen durch die Variation der Zufallsstartzahl sehr stabil ist.

Zusammenfassend ergab die mittlere Standardabweichung über alle Qualitätskennzahlen, Verkehrsnachfragen, Level of Service und Ausstattungsraten 0,8%, bei einem Minimum von 0% und einem Maximum von 9,1% bei der Erkennungsrate. Die Abhängigkeit der Ergebnisse von der Zufallsstartzahl war dabei am stärksten bei der Erkennungsrate ausgeprägt, bei den anderen Qualitätskenngrößen wurde 1% nur in wenigen Ausnahmefällen überschritten.

4.5.2.2 Simulationsdauer

Die Sensitivitätsanalyse Simulationsdauer wurde anhand der in Abschnitt 4.4.1.2.2 genannten Verkehrsnachfragematrix konstanter Verkehrsnachfrage (6:30 Uhr bis 8:30 Uhr) für die Simulationsdauern von 15 Minuten, 30 Minuten, 1 Stunde und 2 Stunden anhand der

Zufallsstartzahl 30432 durchgeführt. Es kam das Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren mit zentraler Kommunikation zur Anwendung. Als Metriken wurden die in Abschnitt 4.4.1.3 definierten aufgezeichnet, für die Analysen wurden folgende daraus verwendet:

- Durchschnittliche Erkennungsrate Level of Service B bis F
- Durchschnittliche Falschalarmrate Level of Service B bis F
- Durchschnittliche zeitliche Genauigkeit Level of Service B bis F
- Durchschnittliche räumliche Genauigkeit Level of Service B bis F

Für jede der genannten Metriken lag jeweils eine Messreihe für jede der Simulationsdauern vor. Damit konnten die bereits in der Sensitivitätsanalyse Zufallsstartzahl genannten Analysen anhand der Standardabweichungen jeder Metrik durchgeführt werden.

Neben der daraus ablesbaren Schwankung ist im Fall der Sensitivitätsanalyse Simulationsdauer jedoch auch interessant, wie sich die Werte bei steigender Simulationsdauer verändern. Als repräsentativer Wert wurde pro Metrik und Level of Service der Mittelwert über alle Ausstattungsarten für eine Simulationsdauer berechnet, also beispielsweise für die Simulationsdauer von 15 Minuten der Mittelwert aller durchschnittlichen Erkennungsraten des LoS D über alle Ausstattungsarten. Damit lag für jede Metrik (und jeden Level of Service) pro Simulationsdauer ein Mittelwert vor. Danach wurden von allen solcher Art berechneten Mittelwerten der Mittelwert des entsprechenden Level of Service der Simulationsdauer von 15 Minuten abgezogen, um das Delta in Bezug auf diesen Startwert zu erhalten.

4.5.2.2.1 Delta der mittleren Erkennungsrate bezogen auf die Simulationsdauer 15 Minuten

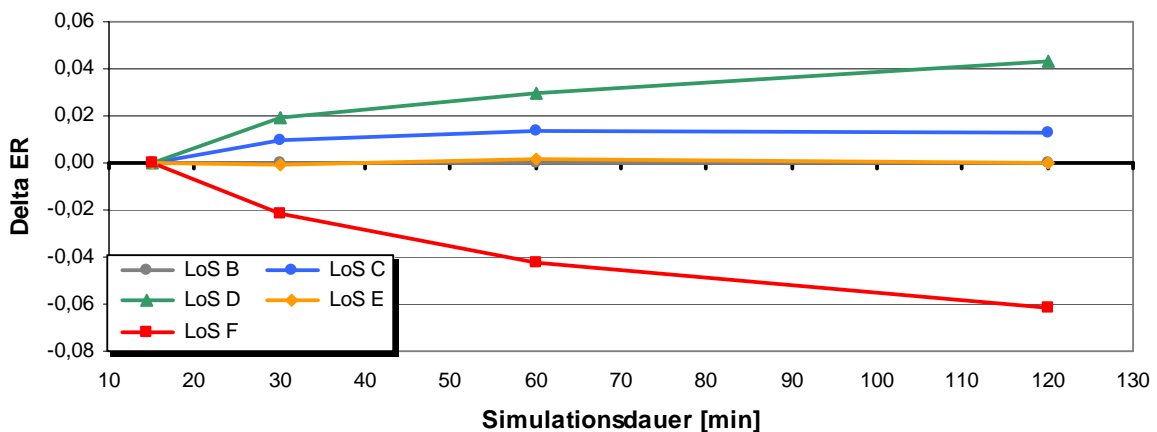


Abbildung 50: Delta der mittleren Erkennungsrate bezogen auf die Simulationsdauer 15 Minuten

Der Mittelwert der durchschnittlichen Erkennungsrate zeigte für den LoS C mit zunehmender Simulationsdauer eine geringfügig steigende Tendenz bis zum Maximum von +0,013 bei 60 und 120 Minuten, wie Abbildung 50 zu entnehmen ist. Für LoS D war ebenso eine Zunahme feststellbar, diese betrug maximal +0,043 bei 120 Minuten Simulationsdauer. Die Werte des LoS B und LoS E ließen keine nennenswerte Veränderung erkennen und LoS F wies einen fallenden Verlauf mit dem Minimum bei -0,062 ebenso bei 120 Minuten. Ausgehend von der Standard-Simulationsdauer der Hauptuntersuchung ergab eine Verdoppelung der Simulationsdauer eine

Zunahme um 0,013 für LoS D, keine Veränderung für LoS B, LoS C und LoS E und eine Abnahme um 0,02 für LoS F. Eine Halbierung der Simulationsdauer führte zu Veränderungen in der gleichen Größenordnung, jedoch mit umgekehrten Vorzeichen. Insgesamt zeigten die erzielten Messwerte eine Abhängigkeit des Mittels der durchschnittlichen Erkennungsrate von der Simulationsdauer, wenn auch in geringem Ausmaß. Die höheren Werte des LoS F relativieren sich, wenn man die Erkenntnisse des Abschnitts 4.5.1.3 über die durchschnittliche Erkennungsrate mit in Betracht zieht, wo festgestellt wurde, dass sich die durchschnittliche Erkennungsrate des LoS F zwischen 0,154 und 0,299 auf relativ hohem Niveau befand. Der fallende Verlauf des Mittels der durchschnittlichen Erkennungsrate kann im Zusammenhang zu den ebenfalls in dem genannten Abschnitt getroffenen Aussagen über den Verlauf der durchschnittlichen Erkennungsrate gesehen werden: dort wurde der Verlauf durch die gegenseitige Kompensation der guten Erkennungsleistung mit einem gegenläufigen, verschlechternden Einfluss erklärt. Die Simulationsdauer kann diesen verschlechternden Einfluss um eine weitere Dimension ergänzen.

4.5.2.2.2 Delta der mittleren Falschalarmrate bezogen auf die Simulationsdauer 15 Minuten

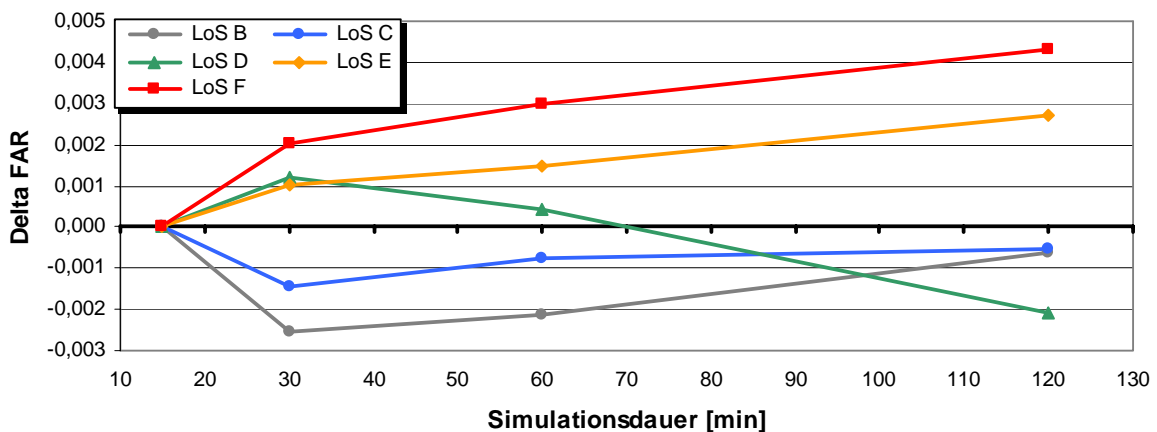


Abbildung 51: Delta der mittleren Falschalarmrate bezogen auf die Simulationsdauer 15 Minuten

Die in Abbildung 51 dargestellten Ergebnisse für die Mittel der durchschnittlichen Falschalarmraten lagen zwischen -0,0025 und 0,004 und damit auf so niedrigem Niveau, dass sie dem Bereich des statistischen Rauschens zugeordnet wurden und sich kaum ein Einfluss der Simulationsdauer auf das Mittel der durchschnittlichen Falschalarmrate ergab.

4.5.2.2.3 Delta der mittleren zeitlichen Genauigkeit bezogen auf die Simulationsdauer 15 Minuten

Die mittlere zeitliche Genauigkeit in Abhängigkeit von der Simulationsdauer aus Abbildung 52 zeigte für alle Level of Service die gleichen Werte, mit zunehmender Simulationsdauer stieg sie zunehmend an. Der größte Anstieg war dabei beim Übergang von 15 Minuten auf 30 Minuten mit etwas 1% feststellbar, die beiden verbleibenden Übergänge von 30 Minuten auf 60 Minuten und von 60 Minuten auf 120 Minuten wiesen beide eine Zunahme der mittleren zeitlichen Genauigkeit von etwa 0,5% aus. Ein Einfluss der Simulationsdauer auf die mittlere zeitliche Genauigkeit war damit gegeben, jedoch mit maximal 2% gering.

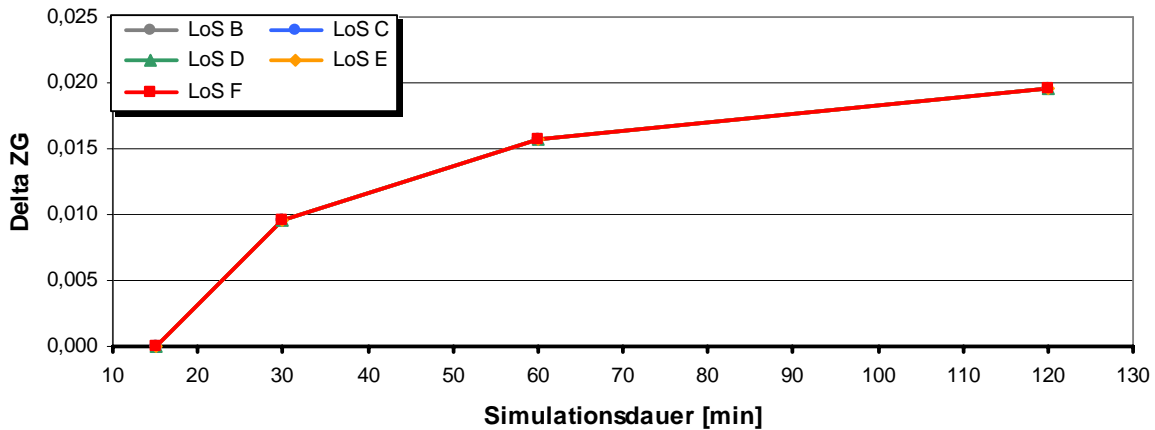


Abbildung 52: Delta der mittleren zeitlichen Genauigkeit bezogen auf die Simulationsdauer 15 Minuten

4.5.2.2.4 Delta der mittleren räumlichen Genauigkeit bezogen auf die Simulationsdauer 15 Minuten

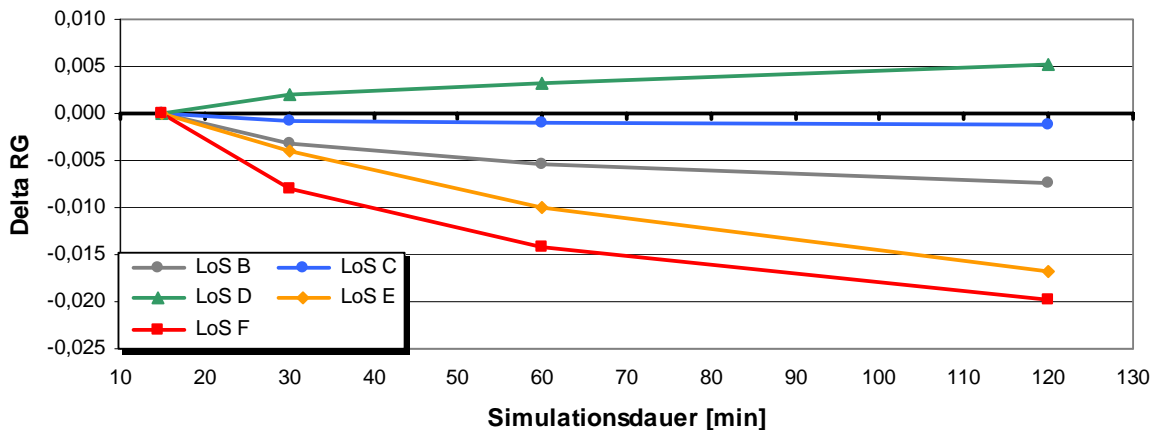


Abbildung 53: Delta der mittleren räumlichen Genauigkeit bezogen auf die Simulationsdauer 15 Minuten

Wie aus Abbildung 53 entnommen werden kann, streuten die Ergebnisse der mittleren räumlichen Genauigkeit der einzelnen Level of Service im Bereich von +0,5% bis -1,9%. LoS B zeigte dabei eine geringfügige Abnahme bis -0,7%, LoS C praktisch keine Veränderung und LoS D eine geringfügige Steigung bis +0,5%, alle Werte jeweils bei 120 Minuten Simulationsdauer. Die Größe dieser Änderungen war dabei gering, sodass die Aussagen wegen der Möglichkeit des Einflusses des statistischen Rauschens mit Vorsicht zu betrachten sind. Für LoS E und LoS F zeigten sich etwas höhere Werte, beide wiesen fallende Werte bis hin zu -1,7% (LoS E), bzw. -1,9% (LoS F) bei 120 Minuten Simulationsdauer aus. Zur möglichen Erklärung dieses Effekts sei auf den Abschnitt 4.5.2.2.1 der mittleren Erkennungsrate verwiesen.

4.5.2.2.5 Standardabweichungen der durchschnittlichen Erkennungsrate

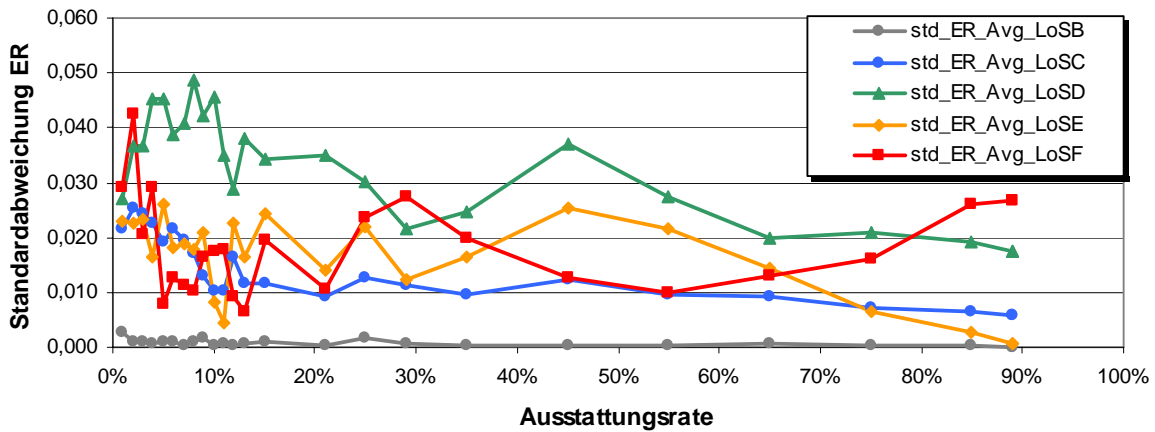


Abbildung 54: Standardabweichungen der durchschnittlichen Erkennungsrate in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate

Über alle Level of Service und Ausstattungsrate ergab die mittlere Standardabweichung der durchschnittlichen Erkennungsrate 1,6% in einem Bereich von 0% bis 4,9%. Die äquivalenten Werte getrennt nach Level of Service lagen bei:

- LoS B 0,1% (0% - 0,3%)
- LoS C 1,4% (0,6% - 2,5%)
- LoS D 3,3% (1,8% - 4,9%),
- LoS E 1,6% (0,1% - 2,6%)
- LoS F 1,9% (0,7% - 4,3%)

Der Trend zeigte für LoS C, LoS D und LoS E mit zunehmender Ausstattungsrate leicht abwärts und blieb für LoS B und LoS F annähernd konstant. Anhand dieser Daten zeigte sich ein geringer Einfluss der Simulationsdauer auf die durchschnittliche Erkennungsrate.

4.5.2.2.6 Standardabweichungen der durchschnittlichen Falschalarmrate

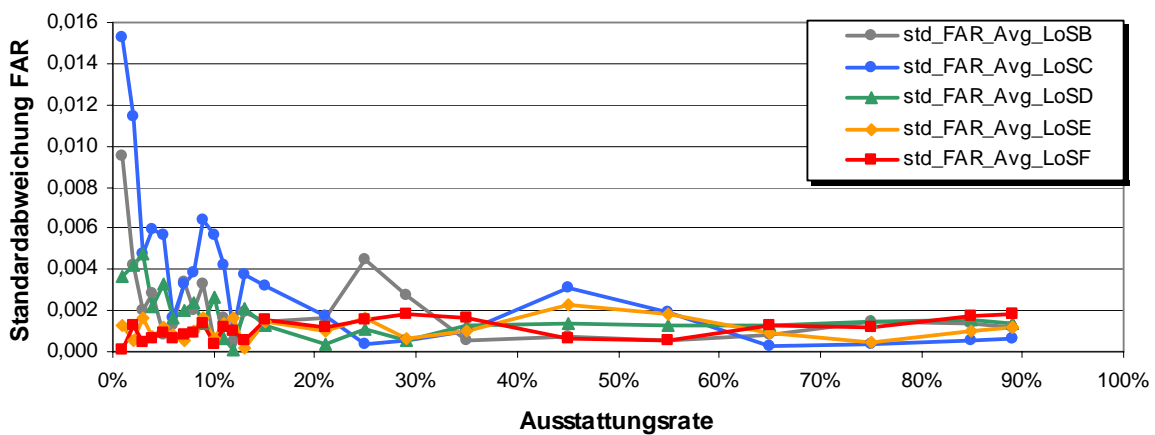


Abbildung 55: Standardabweichungen der durchschnittlichen Falschalarmrate in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate

Für die mittlere Standardabweichung der durchschnittlichen Falschalarmrate über alle Ausstattungsraten und Level of Service wurde 0,2% errechnet mit einem Minimum von 0% und einem Maximum von 1,5%. Getrennt nach Level of Service stellten sich folgende Werte ein:

LoS B	0,2%	(0% - 1%)
LoS C	0,3%	(0% - 1,5%)
LoS D	0,2%	(0% - 0,5%),
LoS E	0,1%	(0% - 0,2%)
LoS F	0,1%	(0% - 0,2%)

Tendenzielle Aussagen waren aufgrund des geringen Niveaus der Mittelwerte nicht zielführend, da in dieser Größenordnung anzunehmen ist, dass das statistische Rauschen überwiegt. Insgesamt ließ das niedrige Niveau der erzielten Ergebnisse den Schluss zu, dass die durchschnittliche Falschalarmrate von der Simulationsdauer kaum beeinflusst wurde.

4.5.2.2.7 Standardabweichungen der durchschnittlichen zeitlichen Genauigkeit

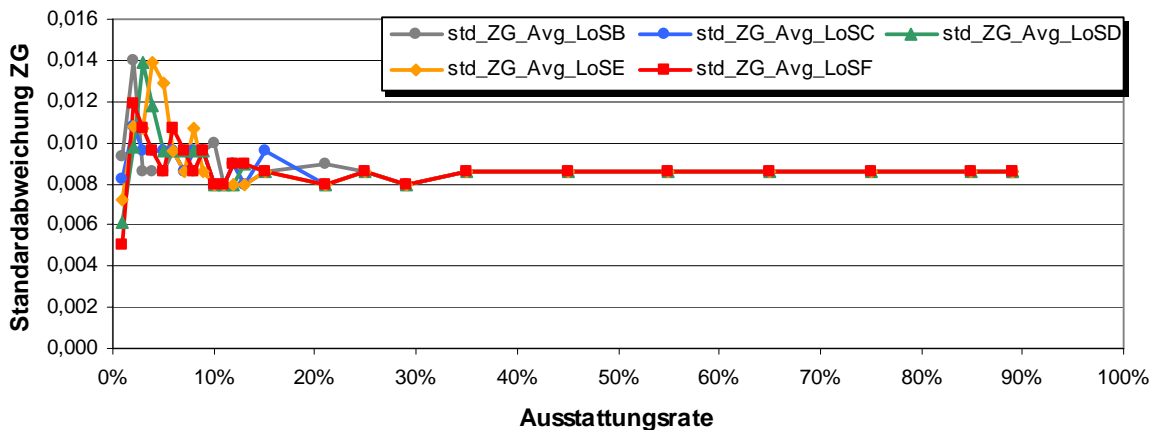


Abbildung 56: Standardabweichungen der durchschnittlichen zeitlichen Genauigkeit in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate

Die mittlere Standardabweichung nahm für die durchschnittliche zeitliche Genauigkeit über alle Level of Service und Ausstattungsraten 0,9% an, alle Werte lagen zwischen 0,5% und 1,4%. Aufgeschlüsselt nach Level of Service berechneten sie sich zu:

LoS B	0,9%	(0,8% - 1,4%)
LoS C	0,9%	(0,8% - 1,1%)
LoS D	0,9%	(0,6% - 1,4%),
LoS E	0,9%	(0,7% - 1,4%)
LoS F	0,9%	(0,5% - 1,2%)

Der Trend war für alle Level of Service etwa konstant, es fällt jedoch auf, dass sich die Verläufe aller Kurven ab einer Ausstattungsrate von 35% auf dem Mittelwert von 0,9% einpendelten. Betrachtete man einen einzelnen Level of Service, so bedeutete ein konstanter Wert der Standardabweichung, dass der Verlauf der zeitlichen Genauigkeit über die Ausstattungsrate für jede Simulationsdauer identisch war, sich jedoch von Simulationsdauer zu Simulationsdauer im Niveau um einen konstanten Betrag unterschied, der zur Standardabweichung von 0,9% führte. Dies deckte sich mit der in Abbildung 52 gemachten Beobachtung des steigenden Mittelwertes der zeitlichen Genauigkeit über alle Ausstattungsraten.

Da sich die Kurven für alle Level of Service überdeckten, gelten die getroffenen Aussagen für alle Level of Service ab einer Ausstattungsrate von 35%. Bei niedrigeren Ausstattungsrate waren sie sinngemäß im Mittel jedoch auch anwendbar, nur die Exaktheit der Übereinstimmung verwischte zunehmend mit abnehmender Ausstattungsrate.

4.5.2.2.8 Standardabweichungen der durchschnittlichen räumlichen Genauigkeit

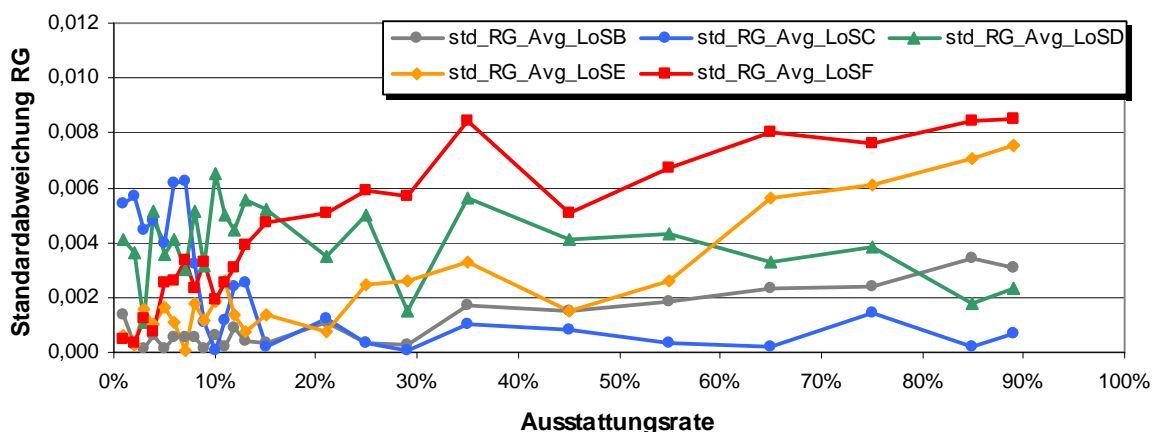


Abbildung 57: Standardabweichungen der durchschnittlichen räumlichen Genauigkeit in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate

Der Mittelwert der Standardabweichungen über alle Level of Service und Ausstattungsrate für die räumliche Genauigkeit erreichte 0,3% mit einer Bandbreite von 0% bis 0,9%.

Das gleiche für die einzelnen Level of Service betrachtet führte zu folgenden Werten:

LoS B	0,1%	(0,3% - 1,4%)
LoS C	0,2%	(0,6% - 1,1%)
LoS D	0,4%	(0,6% - 1,4%),
LoS E	0,3%	(0,8% - 1,4%)
LoS F	0,4%	(0,9% - 1,2%)

Ähnlich der Falschalarmrate war die Nähe zum Bereich des statistischen Rauschens gegeben, aufgrund des etwas höheren Niveaus und der ausgeprägteren Verläufe werden dennoch weiter Angaben gemacht. Die Tendenz von LoS B, LoS E und LoS F zeigten geringfügige Steigung mit zunehmender Ausstattungsrate, für LoS C zeigte sich eine fallende Tendenz und der verbleibende LoS zeigte annähernd einen konstanten Trend. Mit der erwähnten Einschränkung konnte daher ein sehr geringer Einfluss der Simulationsdauer auf die räumliche Genauigkeit festgestellt werden.

4.5.2.3 Abtastintervall

Für die Sensitivitätsanalyse Abtastintervall wurden für zwei Verkehrsnachfragematrizen (6:30 Uhr bis 6:45 Uhr und 8:30 Uhr bis 8:45 Uhr) unter Verwendung der Zufallsstartzahl 30432 die Metriken des Abschnitts 4.4.1.3 für die Abtastintervall 1 Sekunde, 2 Sekunden und 5 Sekunden aufgezeichnet.

Aus der Menge der Metriken wurden folgende Metriken für die Analyse ausgewählt:

- Durchschnittliche Erkennungsrate Level of Service B bis F
- Durchschnittliche Falschalarmrate Level of Service B bis F
- Durchschnittliche zeitliche Genauigkeit Level of Service B bis F
- Durchschnittliche räumliche Genauigkeit Level of Service B bis F

Daraus wurden nach der gleichen Methode wie für die Sensitivitätsanalyse Simulationsdauer die Deltas der genannten Metriken in Relation zu den Werten des Abtastintervalls von 1 Sekunde berechnet. Dies wurde für jede der Verkehrsnachfragen durchgeführt. Da sich jedoch zeigte, dass die resultierenden Kurven der ersten Verkehrsnachfrage sowohl im Verlauf als auch in der Größenordnung praktisch identisch mit denen der zweiten Verkehrsnachfrage waren, wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit die Kurven über beide Verkehrsnachfrage gemittelt.

4.5.2.3.1 Delta der mittleren Erkennungsrate bezogen auf das Abtastintervall 1 Sekunde

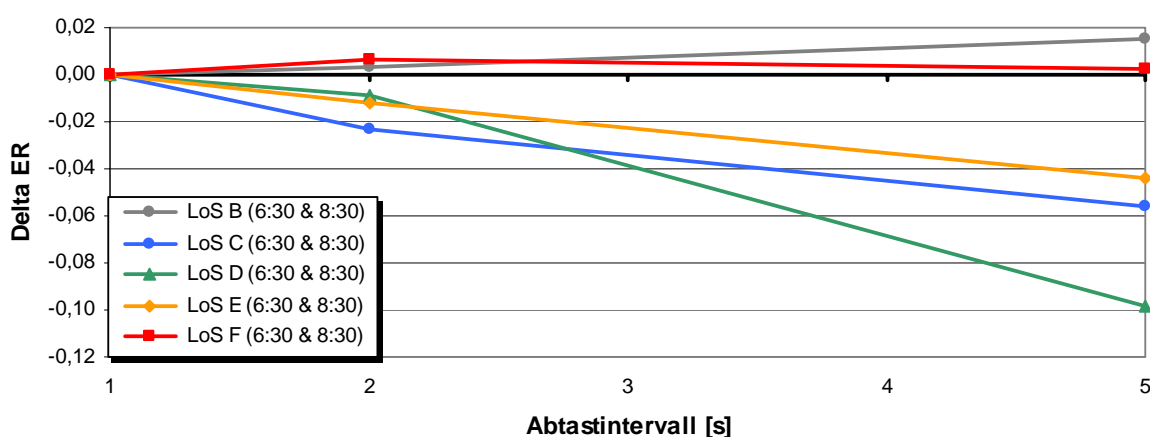


Abbildung 58: Delta der mittleren Erkennungsrate bezogen auf das Abtastintervall 1 Sekunde, gemittelt über die Verkehrsnachfragen 6:30 Uhr bis 6:45 Uhr und 8:30 Uhr bis 8:45 Uhr

Ausgehend vom Abtastintervall 1 Sekunde führte eine Erhöhung auf 2 Sekunden nur zu geringen Änderungen der mittleren Erkennungsrate. Diese betragen maximal +0,6% für LoS F und minimal -2,4% für LoS C. Wurde das Abtastintervall auf 5 Sekunden festgelegt, wurde die Bandbreite bereits größer: maximal +1,4% für LoS B und minimal -10,3% für LoS D. Damit war ein deutlicher Einfluss des Abtastintervalls auf die mittlere Erkennungsrate zu verzeichnen. Dieser Einfluss des Abtastintervalls war jedoch abhängig vom betrachteten Level of Service. Zog man mit in Betracht, dass nach Abschnitt 4.5.1.3 nur der LoS F gute Ergebnisse erzielte, die anderen Level of Service jedoch als mangelhaft klassifiziert wurden, konnte die Abhängigkeit der mittleren Erkennungsrate vom Abtastintervall relativiert werden und gegebenenfalls erneut validiert werden, wenn Verfahrensoptimierungen für andere Level of Service als den LoS F ebenso gute Ergebnisse erzielen konnten.

4.5.2.3.2 Delta der mittleren Falschalarmrate bezogen auf das Abtastintervall 1 Sekunde

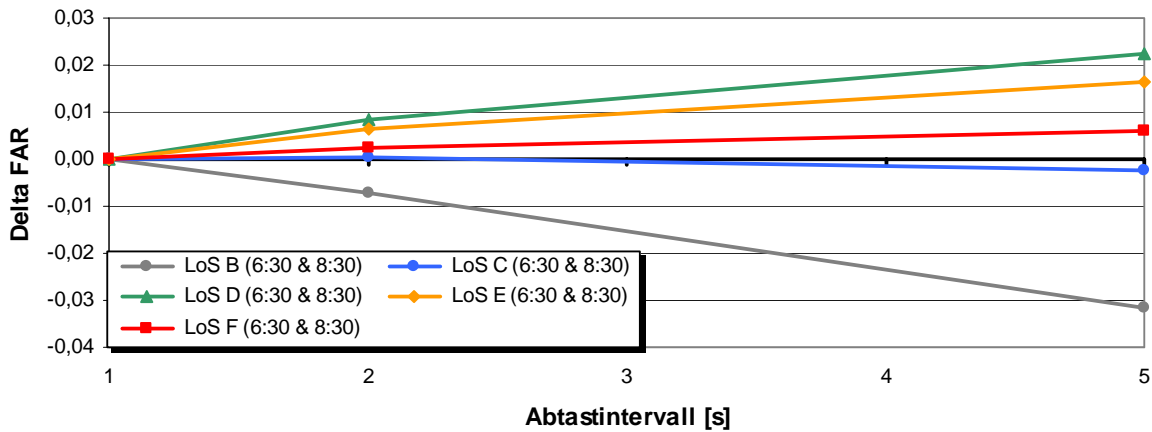


Abbildung 59: Delta der mittleren Falschalarmrate bezogen auf das Abtastintervall 1 Sekunde, gemittelt über die Verkehrsnachfragen 6:30 Uhr bis 6:45 Uhr und 8:30 Uhr bis 8:45 Uhr

Die mittlere Falschalarmrate zeigte ähnlich der mittleren Erkennungsrate bei einer Erhöhung des Abtastintervalls von 1 Sekunde auf 2 Sekunden nur geringe Veränderungen. Unter Verwendung von 5 Sekunden als Abtastintervall bewegten sich die Werte zwischen +2,1% für LoS D und -3% für LoS B. Die Abhängigkeit der mittleren Falschalarmrate vom Abtastintervall war damit in geringem Maß gegeben, war jedoch abhängig vom betrachteten Level of Service und für LoS F sehr gering. Für die anderen Level of Service sei auf Relativierung der mittleren Erkennungsrate verwiesen.

4.5.2.3.3 Delta der mittleren zeitlichen Genauigkeit bezogen auf das Abtastintervall 1 Sekunde

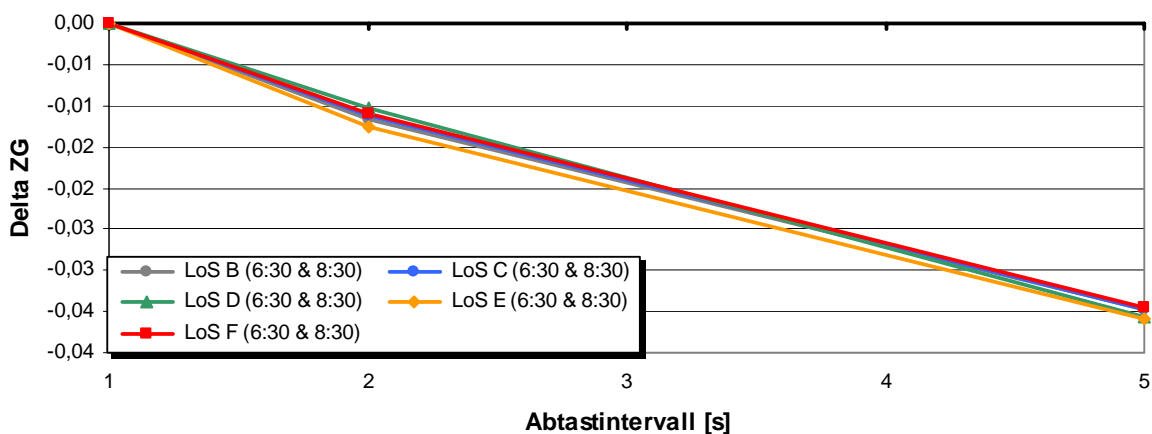


Abbildung 60: Delta der mittleren zeitlichen Genauigkeit bezogen auf das Abtastintervall 1 Sekunde, gemittelt über die Verkehrsnachfragen 6:30 Uhr bis 6:45 Uhr und 8:30 Uhr bis 8:45 Uhr

Die mittlere zeitliche Genauigkeit zeigte für alle Level of Service einen vergleichbaren, fallenden Verlauf. Die Erhöhung des Abtastintervalls von 1 Sekunde auf 2 Sekunden brachte eine Verschlechterung der zeitlichen Genauigkeit von etwa 1,1% für alle Level of Service. Bei einem Abtastintervall von 5 Sekunden betrug diese dann circa 3,7%. Da das Abtastintervall die

Frequenz beeinflusst, mit der Daten in das verkehrstelematische System gelangen, war eine Verschlechterung der mittleren zeitlichen Genauigkeit naturgemäß und zu erwarten und lag in geringer Größenordnung.

4.5.2.3.4 Delta der mittleren räumlichen Genauigkeit bezogen auf das Abtastintervall 1 Sekunde
Bei der mittleren räumlichen Genauigkeit zeigte sich ein ähnliches Bild wie für die Erkennungsrate und die Falschalarmrate. Die Erhöhung des Abtastintervalls von 1 Sekunde auf 2 Sekunde generierte geringfügige Veränderungen im Bereich von +0,6% (LoS B) bis -1,6% (LoS D). Bezogen auf das Abtastintervall von 5 Sekunden wurden Werte zwischen +1,7% (LoS B) und -4,2% (LoS D) erzielt. Eine Abhängigkeit der mittleren räumlichen Genauigkeit war damit gegeben, jedoch mit der bereits in den vorangegangenen Abschnitten schon mehrfach erwähnten Relativierung.

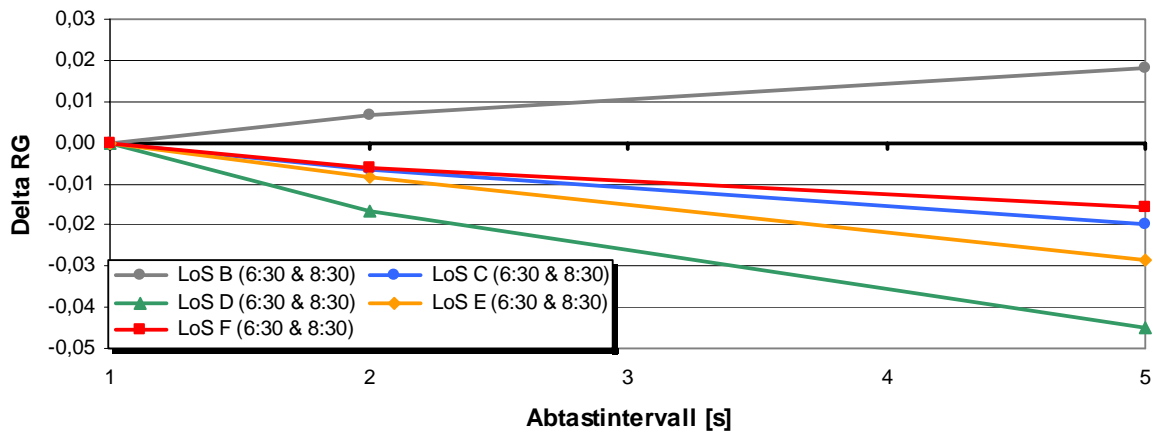


Abbildung 61: Delta der mittleren räumlichen Genauigkeit bezogen auf das Abtastintervall 1 Sekunde, gemittelt über die Verkehrsnachfragen 6:30 Uhr bis 6:45 Uhr und 8:30 Uhr bis 8:45 Uhr

4.5.2.4 Verkehrsnachfrage

Für die Sensitivitätsanalyse Verkehrsnachfrage wurden die in der Hauptuntersuchung aufgenommenen Messreihen der Verkehrsnachfragen 6:30 Uhr bis 7:30 Uhr, 7:30 Uhr bis 8:30 Uhr und 8:30 Uhr bis 9:30 Uhr verwendet und gegenübergestellt. Dies geschah anhand der Qualitätskennzahlen:

- Durchschnittliche Erkennungsrate Level of Service B bis F
- Durchschnittliche Falschalarmrate Level of Service B bis F

Da die erzielten Ergebnisse für die durchschnittliche zeitliche und räumliche Genauigkeit keine neuen Erkenntnisse gegenüber denen brachten, die aus der durchschnittlichen Erkennungsrate und Falschalarmrate gewonnen werden konnten, wurden sie aus Gründen der Übersichtlichkeit hier nicht aufgeführt.

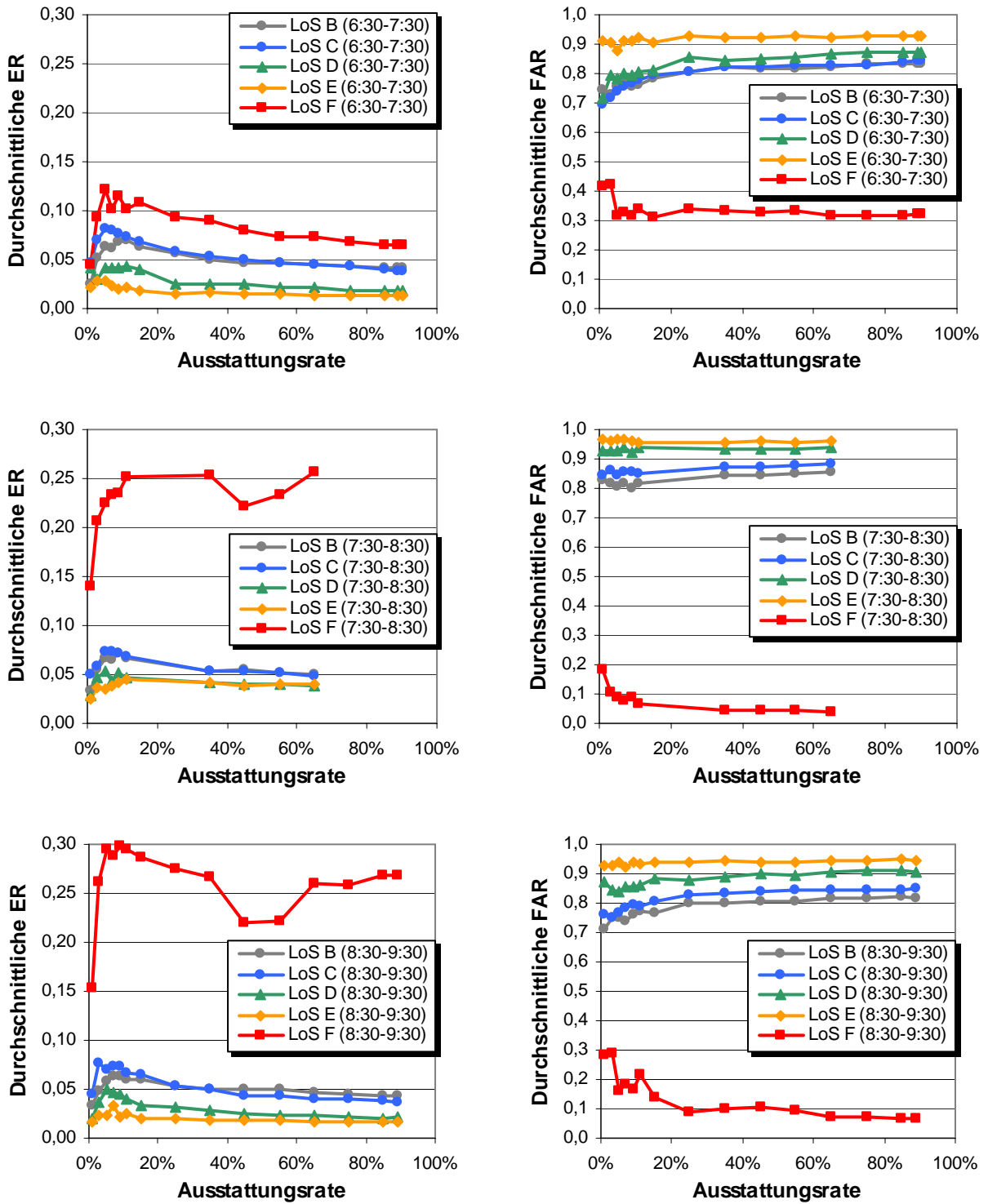


Abbildung 62: Durchschnittliche Erkennungsrate und Falschalarmrate für die Verkehrsnachfragen 6:30 Uhr bis 7:30 Uhr, 7:30 Uhr bis 8:30 Uhr und 8:30 Uhr bis 9:30 Uhr

Für den Vergleich der Metriken wurden die erzielten Messreihen der einzelnen Verkehrsnachfragen direkt in Abbildung 62 gegenübergestellt, ohne sie weiteren statistischen Berechnungen zu unterziehen. Statistische Auswertungen wurden dennoch durchgeführt und immer dann erwähnt, wenn dies sinnvoll erschien.

Um den Vergleich zu erleichtern, wurden die Maßstäbe von gegenüberzustellenden Diagrammen angeglichen. Die Diagramme für die Verkehrsnachfrage von 8:30 Uhr bis 9:30 Uhr wurden bereits in der Hauptuntersuchung im Abschnitt 4.5.1 gezeigt und diskutiert, sie sind aber hier nochmals dargestellt, um die Ergebnisse aller Verkehrsnachfragen im gegenüberstellenden Vergleich zur Verfügung zu stellen.

Für die Verkehrsnachfrage von 7:30 Uhr bis 8:30 Uhr konnten die Messwerte nicht für die gleichen Ausstattungsraten wie in den beiden anderen Verkehrsnachfragen aufgenommen werden, da der Speicher des sie erzeugenden Simulationscomputers überlief. Bis inklusive 65% Ausstattungsrate konnten jedoch Messwerte aufgezeichnet werden, damit war der Verlauf für den Vergleich immer noch gut erkennbar.

Betrachtete man die in Abbildung 62 dargestellten Verläufe der durchschnittlichen Erkennungsrate und der Falschalarmrate im Vergleich über die Verkehrsnachfragen, so ließ sich festhalten, dass sich die im Rahmen der Hauptuntersuchung im Abschnitt 4.5.1 für die Verkehrsnachfrage von 8:30 Uhr bis 9:30 Uhr getroffenen Aussagen über die Verläufe der durchschnittlichen Erkennungsrate und Falschalarmrate qualitativ auf die Ergebnisse der anderen beiden Verkehrsnachfragen übertragen ließen. Einziger Unterschied war der geringfügige Einbruch der durchschnittlichen Erkennungsrate bei den Ausstattungsraten 45% und 55%. Dieser zeigte sich ebenso in der Verkehrsnachfrage von 7:30 Uhr bis 8:30 Uhr, jedoch in geringerem Ausmaß und verschwand in der Verkehrsnachfrage von 6:30 Uhr bis 7:30 Uhr. Die in der Hauptuntersuchung geführte Argumentationslinie stellte zu diesem Umstand jedoch keinen Widerspruch dar, da nicht nur die Ausstattungsrate die Auswahl von partizipierenden Fahrzeugen beeinflusst, sondern auch die Verkehrsnachfrage, da sie die Größenordnung der ins Netz einfahrenden Fahrzeuge steuert.

In quantitativer Hinsicht ergaben sich abhängig vom betrachteten Level of Service mehr oder weniger deutlich ausgeprägte Unterschiede. Die Erkenntnis der Hauptuntersuchung, dass für LoS F gute Ergebnisse erzielt werden konnten, für die verbleibenden Level of Service jedoch ungenügende Resultate vorlagen, konnte mit Einschränkungen auch auf die Verkehrsnachfragen von 6:30 Uhr bis 7:30 Uhr und 7:30 Uhr bis 8:30 Uhr übertragen werden. Die Einschränkung betraf die Verkehrsnachfrage von 6:30 Uhr bis 7:30 Uhr. Hier wurden für den LoS F immer noch die höchsten durchschnittlichen Erkennungsraten und niedrigsten durchschnittlichen Falschalarmraten aufgezeichnet, die Größenordnungen unterschieden sich jedoch nicht mehr so signifikant wie in den anderen Verkehrsnachfragen. So lag der Mittelwert der durchschnittlichen Erkennungsrate über alle Ausstattungsraten für den LoS F bei 8,5%, der Mittelwert des LoS C folgte jedoch mit 5,7%, sodass sich lediglich ein Unterschied von 2,8% ergab. Im Vergleich betrug dieser Mittelwert in der Verkehrsnachfrage von 7:30 Uhr bis 8:30 Uhr für den LoS F 22,6% und den nächstniedrigen LoS C bereits nur mehr 6%. Das berechnet sich zu einer Differenz von 16,6%. Die vergleichbare Differenz der Verkehrsnachfrage 8:30 Uhr bis 9:30 Uhr zwischen LoS F mit 26,1% und LoS C mit 5,4% war 20,7%.

Ein ähnliches Bild ergab sich bei der Falschalarmrate. In der Verkehrsnachfrage von 6:30 Uhr bis 7:30 Uhr war die Differenz zwischen dem Mittelwert der durchschnittlichen Falschalarmrate über alle Ausstattungsraten für den LoS F (33,7%) und dem nächstniedrigen LoS C (79,4%) 45,7%. Der entsprechende Wert für die Verkehrsnachfrage von 7:30 Uhr bis 8:30 Uhr lag für LoS F

(7,8%) und LoS B (82,7%) bereits bei 75% und für die Verkehrsnachfrage von 8:30 Uhr bis 9:30 Uhr für LoS F (14%) und LoS B (78,2%) bei 64,2%.

Insgesamt war damit ein großer Einfluss der Verkehrsnachfrage auf die durchschnittliche Erkennungsrate und Falschalarmrate gegeben. Da die Ausstattungsrate zwar den Prozentsatz der partizipierenden Fahrzeuge am Gesamtkollektiv angibt, die absolute Anzahl an Fahrzeugen jedoch durch die Verkehrsnachfrage vorgegeben wird, standen bei einer geringeren Verkehrsnachfrage wie derjenigen von 6:30 Uhr bis 7:30 Uhr weniger Fahrzeuge dem verkehrstelematischen System zur Verfügung, was das Ergebnis in der dargestellten Form für niedrige Verkehrsnachfragen verschlechterte.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In der Problemstellung in Abschnitt 3 wurde als Zielsetzung der vorliegenden Arbeit die Bereitstellung einer Methodik für die Messung und Analyse an verkehrstelematischen Systemen, sowie eines Rahmenwerks zur Umsetzung dieser festgelegt. Zusätzlich sollte anhand eines geeigneten, nicht-trivialen Anwendungsfalls demonstriert werden, dass die in Abschnitt 3 definierte Methodik in der Lage ist, für den in der Problemstellung identifizierten Informationsmangel Abhilfe zu schaffen. Als Anwendungsfall kam Verkehrsinformation mit Floating Car Data zum Einsatz, darin wurden zwei Floating Car Data Systeme mit der Zielanwendung der Rekonstruktion einer netzweiten Verkehrslage in wiederum zwei unterschiedlichen Kommunikationsszenarien betrachtet. Als zugrunde liegende Verfahren kamen dabei das Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren und das Frequenzdomänenverfahren zum Einsatz.

Betrachtet man die Menge der für den Anwendungsfall erzielten, in Abschnitt 4.5 vorgestellten und diskutierten Ergebnisse, so lässt sich festhalten, dass diese im Rahmen konventioneller Feldversuche nicht erzeugt hätten werden können, besonders nicht Untersuchungen über die gesamte Bandbreite der Ausstattungsraten. Sind die Komponenten und Metriken des verkehrstelematischen Systems einmal im verkehrstelematischen Prüfstand hinterlegt, können auf einfache Weise Veränderungen an Konfigurationen, Modifikationen von Verfahrensbestandteilen oder das Hinzufügen neuer Metriken durchgeführt und untersucht werden. Hierbei erwies sich bei der Untersuchung des Anwendungsfalls das Rahmenwerk als große Hilfestellung, da übliche Komponenten des verkehrstelematischen Systems bereits als Basisklassen zur Verfügung gestellt wurden. Damit konnte man sich auf die wesentlichen Aspekte der Untersuchungen konzentrieren. Der Abbildungsaufwand der verbleibenden Komponenten des verkehrstelematischen Systems wurde damit vertretbar, dass die beteiligten Verfahren im Quellcode zur Verfügung standen.

Die Definition der zu untersuchenden Szenarien zeigte, dass hier mit Bedacht vorgegangen werden muss. Da die Systematik der Kombinationsebenen sehr schnell zu einer sehr hohen Anzahl an zu simulierenden Szenarien führen kann, muss genau überlegt werden, welche Ausprägungen des verkehrstelematischen Systems für die Untersuchungen zwingend notwendig sind.

Die Wahl der Metriken im Anwendungsfall erwies sich für die meisten der durchgeführten Untersuchungen als ausreichend, bei Bedarf konnten weitere Metriken jedoch einfach ergänzt werden und neue Messreihen aufgenommen werden. Speziell die Qualitätskennzahlen sind dabei nicht getrennt voneinander zu betrachten, sondern ergeben nur zusammen ein aussagefähiges Bild.

Als Einschränkung muss genannt werden, dass der zeitliche Rechenaufwand für die Simulation der Szenarien teilweise recht hoch ausfiel. Er war dabei stark vom betrachteten Verfahren und der verwendeten Kommunikationsvariante abhängig. Konnten pro Simulationsdurchgang für das Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren Zeiten in der Größenordnung von halben Tagen erreicht werden, nahm dieser Wert für das Frequenzdomänenverfahren im besten Fall eine Woche an. Ebenso mussten für manche Szenarien Einschränkungen in der Simulationsdauer oder der Ausstattungsraten hingenommen werden, da der Hauptspeicher der Simulationscomputer

nicht mehr ausreichte. Die Möglichkeit des verkehrstelematischen Prüfstands zur Parallelisierung auf mehreren Simulationscomputern schafft hier Abhilfe und wurde für die Erzeugung der Messreihen intensiv genutzt. Über die gesamte Projektlaufzeit waren fünf Simulationscomputer im Einsatz. Dies unterstreicht nochmals die Notwendigkeit, die zu verwendenden Szenarien mit Bedacht auszuwählen.

Insgesamt betrachtet waren die Methodik und das Rahmenwerk gut geeignet, die Messwerte für die im Anwendungsfall geforderten Metriken bereitzustellen. Wie bereits erwähnt, musste sogar eher darauf geachtet werden, dass nicht zu viele Daten erzeugt wurden.

Die erzielten Messwerte des Anwendungsfalls zeigten, dass nur das Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren im zentralen Kommunikationsfall gute Ergebnisse erreichen konnte. Dies war insofern bemerkenswert, da in Bezug auf die Verfahrenskomplexität das Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren eigentlich ein sehr einfaches Verfahren darstellt und in technischer Hinsicht dennoch signifikante Ergebnisse erzielen konnte. Da das Verfahren keinerlei Kostenoptimierung enthielt, waren die verursachten Kostenmengen jedoch extrem hoch. Hier müssten weitere Optimierungsschritte am Verfahren durchgeführt werden, um nicht nur die technische Qualität zu verbessern, sondern auch den Nachrichtenversand deutlich einzuschränken.

Das Frequenzdomänenverfahren war für das vorliegende innerstädtische Verkehrsnetz nicht geeignet. Die Resultate für das Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren im dezentralen Kommunikationsfall waren ebenso sehr schlecht. Dies kann zum einen an einer Schwäche des Verfahrens im dezentralen Kommunikationsfall, zum anderen aber auch an der Art der Erzeugung der Qualitätskennzahlen für lokale Verkehrslagen liegen. Das verwendete Konzept der statistischen Mittelung der lokalen Verkehrslagen machte in der gewählten Zielanwendung durchaus Sinn, da in der Hauptuntersuchung auch ein kommunikationsszenarienübergreifender Vergleich angestellt werden sollte. Hier können weitere Untersuchungen, die sich rein auf dezentrale Kommunikation beschränken, mit einer gegebenenfalls modifizierten Berechnung der Qualitätsindizes Klarheit schaffen.

Die durchgeführten Sensitivitätsanalysen sollten Bestandteil jeder Untersuchung sein, da sie Auskunft darüber geben, wie stark die erzielten Ergebnisse von ausgewählten Eingangsgrößen abhängen. Mit Ausnahme der Verkehrsnachfrage blieben für den Anwendungsfall die Einflüsse gering. Für die Verkehrsnachfrage ergab sich ein stärkerer Einfluss, was aber nicht durch die Methodik bedingt war, sondern dadurch begründet war, dass bei einer gegebenen Ausstattungsrate eine höhere Verkehrsnachfrage mehr, am verkehrstelematischen System partizipierende, Fahrzeuge bedeutet und damit dem System mehr Informationen zur Verfügung stehen.

Die Kostenseite wurde in der vorliegenden Arbeit nur in Form der entstehenden Kostenmengen berücksichtigt, da der zeitliche und finanzielle Rahmen des die Methodik, das Rahmenwerk und den Anwendungsfall umsetzenden Projektes eine Priorisierung auf den Teil der Messung erforderte. Hier ist die Methodik zu wesentlich mehr imstande, umfangreiche wirtschaftliche Analysen im Rahmen einer Geschäftsmodellierung wären hier sinnvolle weitere Anwendungsmöglichkeiten.

Die Umsetzung des Anwendungsfalls hat gezeigt, dass die Zielanwendung Rekonstruktion der Verkehrslage mit Hilfe von Floating Car Data Systemen kritisch vermessen werden kann. Darauf aufbauend können Schlüsse gezogen werden, die gegebenenfalls die Erhebung weiterer Messreihen durch erforderliche Modifikationen oder Optimierungen nach sich ziehen können. Die Ergebnisse der untersuchten Verfahren waren dabei bei Weitem nicht optimal, was der ursprünglichen Vermutung auf dem Weg zur Problemstellung der vorliegenden Arbeit entsprach, dass zu wenig kritische Daten für verkehrstelematische Systeme vorlagen.

Löst man sich von der Zielanwendung der reinen Rekonstruktion der Verkehrslage, so sind mit dem verkehrstelematischen Prüfstand ebenso Untersuchungen möglich, die das Rückkoppeln der rekonstruierten Verkehrsinformationen auf die Fahrzeugsteuerung der Fahrzeuge berücksichtigen. Die für den Anwendungsfall definierten Metriken können für diesen Fall verwendet werden.

Verlässt man die Domäne der Verkehrsinformationserzeugung, sind im verkehrstelematischen Prüfstand ebenso Untersuchungen bei reiner Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation denkbar. Hier könnte die lokale Gefahrenwarnung betrachtet werden, aber auch Systeme, die nicht nur verkehrsrelevante Informationen austauschen, sondern beliebige andere Applikationen wie etwa aus dem Bereich des Infotainment oder Location Referencing (genaue Wiedererkennung von Positionen in einem Verkehrsnetz) umsetzen. Für diese müssten dann, wie in der Methodik allgemein formuliert, die umzusetzende Zielanwendung und geeignete Metriken definiert werden.

Spannt man den Bogen noch etwas weiter, könnten durch Modellierung öffentlicher Verkehrslinien in den Verkehrsnetzdaten Untersuchungen für den öffentlichen Verkehr durchgeführt werden, der den realen Einflüssen des ihn umgebenden Individualverkehrs unterliegt. Durch Definition geeigneter Metriken wären auch Untersuchungen von Zeitvorteilen oder auch –nachteilen bei der Benutzung von öffentlichem Verkehr im Vergleich zum Individualverkehr möglich. Durch Festlegung der entsprechenden Kostenmengen wäre auch eine wirtschaftliche Gegenüberstellung denkbar, die sowohl – statistisch gemittelt – für das Individuum als auch aufsummiert in volkswirtschaftlicher Hinsicht Daten erheben und auswerten könnte.

6 Quellennachweis

- [BAL98] Balzert, H.
Lehrbuch der Software-Technik: Software-Management, Software-Qualitätssicherung, Unternehmensmodellierung; Spektrum, Akademischer Verlag, Heidelberg/Berlin, 1998
- [BIB06] Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus A.G.
Der Brockhaus multimedial 2006; Mannheim 2006
- [BMB02] Bundesministerium für Bildung und Forschung
FleetNet – Internet on the Road; Projektübersicht, Mai 2002
- [BMW03] BMW AG
Weniger Stau durch sprechende Autos; BMW Presseinformation September 2003: <http://www.7-forum.com/news/Weniger-Stau-durch-sprechende-Autos-143.html>, zuletzt abgerufen 14. Januar 2009
- [BMW99] BMW AG AK-2
Mobile Datenerfassung für neue Telematikdienste; ALEX – Aktuelles Lexikon, 1999
- [BOG03] Bogenberger, K.
The Quality of Traffic Information; Straßenverkehrstechnik 09/03, 2003
- [BRI93] Brilon, W., Großmann, M., Blanke, H.
Verfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufs auf Straßen – Entwurf eines Handbuchs; Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswesen, Bochum, 1993
- [DEM03] Demir, C., Kerner, B. S., Herrtwich, R. G., Klenov, S. L., Rehborn, H., Aleksic, M., Reigber, T., Schwab, M., Haug, A.
FCD for Urban Areas: Method and Analysis of Practical Realisations; Proceedings zum 8. ITS World Congress, Madrid, Spanien 2003
- [DOE05] Doehring, C.
Verkehrslagebilder bei telematischen Applikationen; Diplomarbeit, Hochschule Harz, Wernigerode, 2005
- [FAS97] Fastenrath, U.
Floating Car Data on a Larger Scale; ITS-World Congress, DDG Gesellschaft für Verkehrsdaten mbH, Tech. Rep., 1997
- [FGS01] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.
Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen; Köln, 2001

- [GÖS01] Gössel, F., Wrase, B., Michler, E.
 Neue Ansätze zur fahrzeuggenerierten Verkehrsdatengewinnung in urbanen Regionen: Processing, Analyse und Qualifizierung von Floating-Car-Daten; 18. Verkehrswissenschaftliche Tage Dresden, Dresden, 2001
- [HRB65] Highway Research Board
 Highway Capacity Manual; Special Report Nr. 87, Washington D.C., 1965
- [HUB01a] Huber, W.
 Fahrzeuggenerierte Daten zur Gewinnung von Verkehrsinformationen; Dissertation, Technische Universität München, Institut für Verkehrswesen, Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung, München 2001
- [HUB01b] Huber, W.
 Fahrzeuggenerierte Daten zur Gewinnung von Verkehrsinformation; Kurzfassung der Dissertation Technische Universität München, Institut für Verkehrswesen, Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung, München 2001
- [JIE04] Jie, W., Stojmenovic, I.
 Ad Hoc Networks; IEEE Computer Society, IEEE Press, 2004
- [JIN05] Jin, C.
 Erzeugen der Cost Quality Profiles neuartiger Verkehrsinformationssysteme und Sicherstellung ihres Realitätsbezuges; Bachelorarbeit, Universität Hannover, Institut für mikroelektronische Systeme, Hannover, 2005
- [KEL04] Kelm, C.
 Wirtschaftlichkeitsanalyse von Verkehrserfassungssystemen; Diplomarbeit, Fachhochschule Stralsund, Fachbereich Maschinenbau, Stralsund, 2004
- [KER05] Kerner, B. S., Herrtwich, R. G., Klenov, S.L., Demir, C., Rehborn, H., Aleksic, M., Haug, A., Schwab, M., Reigber, T.
 Verkehrsstörungserkennung mit FCD-Fahrzeugen in Straßennetzen; Internationales Verkehrswesen 7+8 2005, Hamburg 2005
- [KIS99] Kistner, K. P., Steven, M.
 Betriebswirtschaftslehre im Grundstudium 1; Physica-Verlag, Heidelberg, 1999
- [KOS04] Kosch, T.
 Local Danger Warning based on Vehicle Ad-hoc Networks: Prototype and Simulation; International Workshop on Intelligent Transportation, Hamburg, 2004

- [LAM03] Lampl, D.
Intelligent FCD-Protocol, Evaluation and Analysis; Diplomarbeit, Technische Universität Wien, Institut für Software Engineering und interaktive Systeme, Wien 2003
- [LAM05] Lampl, D.
Cost Quality Profile of Floating Car Data; Proceedings zum 5. ITS Europe Congress, Hannover 2005
- [MAT07] Matschke, I.
Einfluss dynamischer Navigation auf das Verkehrsgeschehen in städtischen Straßennetzen; Dissertation, Universität Hannover, Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Hannover, 2007
- [MUL02] Mulligan, A.-M., Nicholson, A.
Uncertainty in Traffic Flow Estimation Using the Moving-Observer Method; IPENZ Transportation Group Conference Papers, 2002
- [MYS04] MySQL AB
MySQL; MySQL Reference Manual, 2004
- [NEU05] Neumann, T.
Verfahrensentwicklung zur Verkehrslagerekonstruktion aus der Kraftfahrzeugsensorik; Praktikumsabschlussbericht Robert Bosch GmbH; Hildesheim, 2005
- [OFF01] Offermann, F.
Ein Neuro-Fuzzy-Modell zur Reisegeschwindigkeitsabschätzung auf Richtungsfahrbahnen basierend auf einer Fusion lokaler und fahrzeuggenerierter Verkehrsdaten; Dissertation Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Institut für Straßenwesen, Lehrstuhl für Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Aachen 2001
- [SCA48] Shannon, C. E.
A Mathematical Theory of Communication; Bell System Technical Journal, Vol. 27, pp. 379-423 (Part I), pp. 623-656 (Part II), 1948
- [SCB97] Schnabel, W., Lohse, D.
Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung, Band 2; Verlag für Bauwesen, Berlin, 1997
- [SCB97a] Schnabel, W., Lohse, D.
Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung, Band 1; Verlag für Bauwesen, Berlin, 1997

- [SCF03] Schäfer R. P., Gühneemann A., Thiessenhusen, K.-U.
Neue Ansätze im Verkehrsmonitoring durch Floating Car Data; 19. Verkehrswissenschaftliche Tage Dresden, Dresden, 2003
- [SCN00] Schnörr, C.
Von der Messwerterfassung bis zu automatisch generierten Verkehrsmeldungen; Straßenverkehrstechnik 1/2000, Bonn 2000
- [SUN02] Sun Microsystems, Inc.
JDBC; JDBC API Specification, 2002
- [SUN03] Sun Microsystems, Inc.
Java Native Interface Specification, 2003
- [SUN06] Sun Microsystems, Inc.
JAVA; Java 2 Platform Standard Edition 5.0, API Specification, 2006
- [TMA04] The MathWorks, Inc.
MATLAB 6; MATLAB, The Language of Technical Computing, Natick, 2004
- [TRB00] Transport Research Board
Highway Capacity Manual 2000; Washington D.C., 2000
- [TSS05a] Transport Simulation Systems
AIMSUN NG; User's Manual, Barcelona, 2005
- [TSS05b] Transport Simulation Systems
AIMSUNG NG; AIMSUN API Manual, Barcelona, 2005
- [WAR54] Wardrop, B.A., Charlesworth G.
A Method of Estimating Speed and Flow of Traffic from a Moving Vehicle; Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 3, Part II, 158-169, London, 1954
- [WIK06] Wikimedia Foundation Inc.
Wikipedia, <http://de.wikipedia.org/wiki/Verkehrstelematik>, 2. März 2006
- [WIK08] Wikimedia Foundation Inc.
Wikipedia, <http://de.wikipedia.org/wiki/Sensitivit%C3%A4tsanalyse>, 4. Juni 2008
- [WIS03a] Wischhof, L., Ebner, A., Rohling, H., Lott, M., Halfmann, R.
SOTIS – A Self-Organizing Traffic Information System; Proceedings zur 57. IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference, Jeju, Korea, April 2003

- [WIS03b] Wischhof, L., Ebner, A., Rohling, H., Lott, M., Halfmann, R.
 Adaptive Broadcast for Travel and Traffic Information Distribution Based on
 Inter-Vehicle Communication; Proceedings zum IEEE Intelligent Vehicles
 Symposium IV 2003, Columbus, Ohio, USA, June 2003
- [WIS04] Wischhof, L., Ebner, A., Rohling, H.
 Self-Organizing Traffic Information System based on Car-to-Car-
 Communication: Prototype Implementation; WIT 2004 - 1st International
 Workshop on Intelligent Transportation, Hamburg, 2004

7 Anhang

7.1 Beschreibung der Datenbanktabellen

7.1.1 Konfiguration

classes

Verzeichnis aller Komponenten

Spaltenname	Beschreibung
classId	Systemweit eindeutiger Identifikator (ID) einer Komponente
className	Name der Komponente wie im Quellcode aufgeführt

client_fleets

Verzeichnis der Fahrzeugflotten (Servicekomponente zur Auswahl von partizipierenden Fahrzeugen)

Spaltenname	Beschreibung
clientFleetId	Fortlaufende Nummerierung
clientFleetType	Typ der Fahrzeugflotte (frei wählbar)
clientFleetClassId	ID (siehe classes) der zu verwendenden Komponente

client_set_selectors

Verzeichnis der Komponenten zur Auswahl partizipierender Fahrzeuge aus dem Gesamtkollektiv abhängig von der Ausstattungsrate

Spaltenname	Beschreibung
clientSetSelectorId	Fortlaufende Nummerierung
clientSetSelectorClassId	ID (siehe classes) der zu verwendenden Komponente
clientSetSelectorVehicleTypeName	Name der zu verwendenden Fahrzeugart, vorgegeben von Fahrzeugsteuerung. „all“ für alle Fahrzeugarten

client_set_selectors_client_fleets1

Verschaltungstabelle zwischen client_fleets und client_set_selectors

Spaltenname	Beschreibung
clientFleetId	Nummer der Fahrzeugflotte in Tabelle client_fleets
clientSetSelectorId	Nummer der Auswahlkomponente in Tabelle client_set_selectors

clients

Verzeichnis aller Fahrzeug-Komponenten

Spaltenname	Beschreibung
clientId	Fortlaufende Nummerierung
clientType	Name der Fahrzeugtyps
clientClassId	ID (siehe classes) der zu verwendenden Komponente

computation_engine_parameter_sets

Verzeichnis der Betriebsparameter für die fahrzeugseitigen Datenverarbeitungseinheiten

Spaltenname	Beschreibung
computationEngineParameterSetId	Fortlaufenden Nummerierung einer Menge von Betriebsparametern
computationEngineId	Nummer der fahrzeugseitigen Datenverarbeitung in Tabelle computation_engines, für die diese Betriebsparameter gültig sind
computationEngineParameterSet	Frei wählbarer Text, der Betriebsparameter. Das Format wird von der unter computationEngineId genannten fahrzeugseitigen Datenverarbeitung vorgegeben (z.B. kommagetrennte Liste)

computation_engines

Verzeichnis aller fahrzeugseitigen Datenverarbeitungseinheiten

Spaltenname	Beschreibung
computationEngineId	Fortlaufende Nummerierung
computationEngineClassId	ID (siehe classes) der zu verwendenden Komponente

computation_engines_clients1

Verschaltungstabelle zwischen clients und computation_engines

Spaltenname	Beschreibung
clientId	Nummer der Fahrzeugkomponente in Tabelle clients
computationEngineId	Nummer der fahrzeugseitigen Datenverarbeitung in Tabelle computation_engines

cost_objects

Verzeichnis aller Kostenträger

Spaltenname	Beschreibung
costObjectsId	Fortlaufende Nummerierung
name	Name des Kostenträgers

cost_units

Verzeichnis der Kostenmengen

Spaltenname	Beschreibung
costUnitId	Fortlaufende Nummerierung
type	Kostenart (acquisition, fixed, variable)
ownerClassId	ID (siehe classes) der diese Kostenmenge verursachenden Komponente
name	Name der Kostenmenge

costs_per_unit

Verzeichnis der Stückkosten

Spaltenname	Beschreibung
costsPerUnitId	Fortlaufende Nummerierung
costUnitId	Nummer der Kostenmenge in Tabelle cost_units
costsPerUnit	Stückkosten [€]

criterion_configurations

Verzeichnis der Metrikkonfigurationen

Spaltenname	Beschreibung
criterionConfigurationId	Fortlaufende Nummerierung
criterionClassId	ID (siehe classes) der zu verwendenden Metrik-Komponente
updateMode	Aktualisierungsfrequenz (update, final)
configuration	Frei wählbarer Text für Parameter. Das Format des Texts wird von der entsprechenden Metrik-Komponente vorgegeben

criterion_configurations_replication_configurations1

Verschaltungstabelle zwischen replication_configurations und criterion_configurations

Spaltenname	Beschreibung
replicationConfigurationId	Nummer der Messaufbau-Konfiguration in Tabelle replication_configurations
criterionConfigurationId	Nummer der Metrikkonfiguration in Tabelle criterion_configurations

generated_streams

Verzeichnis aller aufgezeichneten Datenquellen

Spaltenname	Beschreibung
id	Fortlaufende Nummerierung
type	Typ der Datenquelle (streetNet, dynamicData)
replicationId	Identifikator des verwendeten Messaufbaus
randomSeed	Verwendete Zufallsstartzahl für den Zufallsgenerator
streetNetName	Name des verwendeten Verkehrsnetzes
demandName	Name der verwendeten OD-Matrix
samplingInterval	Zeitschritt [s]
streamFileName	Dateiname
simulationDuration	Simulationsdauer der Datenquelle [s]

positioning_technology_parameter_sets

Verzeichnis der Kalibrierungswerte für die Ortungstechnologie

Spaltenname	Beschreibung
positioningTechnologyParameterSetId	Fortlaufende Nummerierung
positioningTechnologyParameterSetName	Frei wählbarer Name
avgPositioningDeviation	Durchschnittliche Positionsabweichung [m]
stdPositioningDeviation	Schwankung der Positionsabweichung [m]
sizeOfSinglePosition	Größe einer Positionsangabe [byte]

positioning_technology_parameter_sets_clients1

Verschaltungstabelle zwischen clients und positioning_technology_parameter_sets

Spaltenname	Beschreibung
clientId	Nummer der Fahrzeugkomponente in Tabelle clients
positioningTechnologyParameterSetId	Nummer der Kalibrierungswerte in Tabelle positioning_technology_parameter_sets

protocol_parameter_sets

Verzeichnis der Kalibrierungswerte für das Übertragungsprotokoll

Spaltenname	Beschreibung
protocolParameterSetId	Fortlaufende Nummerierung
protocolParameterSetName	Frei wählbarer Name
staticOverheadPerMessage	Größe der Verwaltungsdaten pro Nachricht bei Nachrichtenversand [byte]
dynamicOverheadPerByte	Größe der Verwaltungsdaten zusätzlich pro Zwischengröße bei Verwendung von Protokollen, die den Versand von mehreren Nachrichten in einem Nachrichtencontainer ermöglichen [byte]

protocol_parameter_sets_transmission_channels1

Verschaltungstabelle zwischen transmission_channels und protocol_parameter_sets

Spaltenname	Beschreibung
transmissionChannelId	Nummer des Übertragungskanals in Tabelle transmission_channels
protocolParameterSetId	Nummer der Kalibrierungswerte in Tabelle protocol_parameter_sets

replication_configurations

Verzeichnis der Messaufbau-Konfigurationen

Spaltenname	Beschreibung
replicationConfigurationId	Fortlaufende Nummerierung
simulatorClassId	ID (siehe classes) der zu verwendenden Simulator-Komponente (Service-Komponente der szenarienbasierten Simulation zur Ansteuerung des verkehrstelematischen Prüfstands)
trafficClassId	ID (siehe classes) der zu verwendenden Traffic-Komponente (Service-Komponente zum Aktualisieren der Fahrzeugdaten)
inputDataCriteriaContainerClassId	ID (siehe classes) der zu verwendenden Profil-Komponente
loSThresholdTables	Übergeordnete Schwellwerte für Level of Services

replications

Verzeichnis der Messaufbauten

Spaltenname	Beschreibung
batchId	Fortlaufende Nummerierung eines Stapels von Messaufbauten
activated	Schalter zum Aktivieren/Deaktivieren eines Messaufbaus (0,1)
batchName	Frei wählbarer Name des Stapels
replicationId	Zu verwendende Nummer des Messaufbaus innerhalb eines Stapels
replicationIdOffset	Zu verwendender Aufschlag auf die Nummer des Messaufbaus
replicationConfigurationId	Nummer der Messaufbau-Konfiguration in Tabelle replication_configurations
streetNetStreamId	Nummer des verwendeten aufgezeichneten Verkehrsnetzes in Tabelle generated_streams
dynamicDataStreamId	Nummer der zu erfordernden Datenquelle in Tabelle generated_streams

scenario_configurations

Verzeichnis der Szenarioklassen

Spaltenname	Beschreibung
scenarioConfigurationId	Fortlaufende Nummerierung
scenarioConfigurationName	Frei wählbarer Name
scenarioClassId	ID (siehe classes) der zu verwendenden Scenario-Komponente (Service-Komponente für alle Komponenten eines Szenarios)
clientFleetType	Typ der Fahrzeugflotte wie Tabelle client_fleets definiert
clientType	Typ der Fahrzeug-Komponente wie Tabelle clients definiert
interVehicleTransmissionChannelType	Typ des Übertragungskanals (Fahrzeug-Fahrzeug) wie Tabelle transmission_channels definiert

scenario_configurations_replication_configurations1

Verschaltungstabelle für Szenarioklassen zwischen replication_configurations und scenario_configurations

Spaltenname	Beschreibung
replicationConfigurationId	Nummer der Messaufbau-Konfiguration in Tabelle replication_configurations
scenarioConfigurationId	Nummer der Szenarioklasse in Tabelle scenario_configurations
executedAtHost	Rechnername bei verteilter Simulation auf mehreren Computern
beginCoverRate	Startwert der Ausstattungsrate einer Szenarioklasse [%]
endCoverRate	Endwert der Ausstattungsrate einer Szenarioklasse [%]
stepCoverRate	Schrittweite der Ausstattungsrate einer Szenarioklasse [%]

scenario_server_communications

Verschaltungstabelle zur Festlegung der Kommunikationsstruktur auf Szenarioklassenebene

Spaltenname	Beschreibung
scenarioServerCommunicationId	Fortlaufende Nummerierung
scenarioConfigurationId	Nummer der Szenarioklasse in Tabelle scenario_configurations
serverType	Typ der Zentrale wie Tabelle servers definiert
uplinkTransmissionChannelType	Typ des Übertragungskanals im up-link wie Tabelle transmission_channels definiert
downlinkTransmissionChannelType	Typ des Übertragungskanals im down-link wie Tabelle transmission_channels definiert

servers

Verzeichnis der Zentralen

Spaltenname	Beschreibung
serverId	Fortlaufende Nummerierung
serverType	Name des Typs der Zentrale
serverClassId	ID (siehe classes) der zu verwendenden Komponente

traffic_situation_generator_parameter_sets

Verzeichnis der Betriebsparameter für die empfängerseitigen Datenverarbeitungseinheiten

Spaltenname	Beschreibung
trafficSituationGeneratorParameterSetId	Fortlaufende Nummerierung einer Menge von Betriebsparametern
trafficSituationGeneratorId	Nummer der empfängerseitigen Datenverarbeitung in Tabelle traffic_situation_generators, für die diese Betriebsparameter gültig sind
trafficSituationGeneratorParameterSet	Frei wählbarer Text, der Betriebsparameter. Das Format wird von der unter trafficSituationGeneratorId genannten empfängerseitigen Datenverarbeitung vorgegeben (z.B. kommagetrennte Liste)

traffic_situation_generators

Verzeichnis der empfängerseitigen Datenverarbeitungseinheiten

Spaltenname	Beschreibung
trafficSituationGeneratorId	Fortlaufende Nummerierung
trafficSituationGeneratorClassId	ID (siehe classes) der zu verwendenden Komponente

traffic_situation_generators_clients1

Verschaltungstabelle zwischen clients und traffic_situation_generators

Spaltenname	Beschreibung
clientId	Nummer des Fahrzeugs in Tabelle clients
trafficSituationGeneratorId	Nummer der empfängerseitigen Datenverarbeitung in Tabelle traffic_situation_generators

traffic_situation_generators_servers1

Verschaltungstabelle zwischen servers und traffic_situation_generators

Spaltenname	Beschreibung
serverId	Nummer der Zentrale in Tabelle servers
trafficSituationGeneratorId	Nummer der empfängerseitigen Datenverarbeitung in Tabelle traffic_situation_generators

trans_tech_parameter_sets

Verzeichnis der Kalibrierungswerte für Übertragungskanäle

Spaltenname	Beschreibung
transTechParameterSetId	Fortlaufende Nummerierung
transTechParameterSetName	Frei wählbarer Name
avgDelayTime	Durchschnittliche Verzögerungszeit im Verbindungsaufbau [s]
stdDelayTime	Schwankung der Verzögerungszeit im Verbindungsaufbau [s]
avgTransmissionDuration	Durchschnittliche Übertragungsdauer [s]
stdTransmissionDuration	Schwankung der Übertragungsdauer [s]
messageLossRate	Verlustrate von Nachrichten [%]
maxMessageSize	Maximale Größe einer Nachricht (z.B. bei SMS) [byte]
avgTransmissionRangeSquare	Durchschnittliche Übertragungsreichweite zum Quadrat [m ²]
stdTransmissionRangeSquare	Schwankung der Übertragungsreichweite zum Quadrat [m ²]

trans_tech_parameter_sets_transmission_channels1

Verschaltungstabelle zwischen transmission_channels und trans_tech_parameter_sets

Spaltenname	Beschreibung
transmissionChannelId	Nummer des Übertragungskanals in Tabelle transmission_channels
transTechParameterSetId	Nummer der Kalibrierungswerte in Tabelle trans_tech_parameter_sets

transmission_channels

Verzeichnis der Übertragungskanäle

Spaltenname	Beschreibung
transmissionChannelId	Fortlaufende Nummerierung
transmissionChannelType	Name des Typs des Übertragungskanals
transmissionChannelClassId	ID (siehe classes) der zu verwendenden Komponente

Tabelle 13: Beschreibung der Datenbanktabellen der Konfigurationen

7.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispielhafte Fahrzeugsensorik [BMW99].....	3
Abbildung 2: Gemeinsamer Datenverarbeitungsprozess FCD Verfahren.....	4
Abbildung 3: Beispiel dezentraler Kommunikation [BMW03]	5
Abbildung 4: Zeitbezogene Darstellung der Erkennung gestörter und ungestörter Bereiche des Fahrtablaufs [HUB01b].....	13
Abbildung 5: Prognose der Reisezeit ([DEM03], übersetzt aus dem Englischen).....	18
Abbildung 6: Zeit- und Frequenzdomäne von Geschwindigkeitsganglinien ([LAM03], Evaluationssoftware)	21
Abbildung 7: Störungsfaktor für außerstädtischen freien Verkehr [LAM03].....	24
Abbildung 8: Störungsfaktor für eine außerstädtische Störung [LAM03]	25
Abbildung 9: Störungsfaktor für freien Stadtverkehr [LAM03]	25
Abbildung 10: Nachrichtenweiterleitung, Zeitpunkt t_1 ([WIS03a], vereinfacht)	28
Abbildung 11: Nachrichtenweiterleitung, Zeitpunkt t_2 ([WIS03a], vereinfacht)	28
Abbildung 12: Informationsverzögerung in Abhängigkeit der Ausstattungsrate [WIS04].....	29
Abbildung 13: Shannonsche Informationskette [SCA48]	40
Abbildung 14: Datenverarbeitungsprozess von verkehrstelematischen Systemen.....	41
Abbildung 15: Aufbau und Einbettung des verkehrstelematischen Prüfstands	45
Abbildung 16: Basiskomponenten eines verkehrstelematisches Systems	50
Abbildung 17: Zusammenhang der Kombinationsebenen von Szenarien	56
Abbildung 18: Szenario	57
Abbildung 19: Szenarioklasse	59
Abbildung 20: Messaufbau.....	61
Abbildung 21: Datenbanktabellen der Kombinationsebenen Messaufbau und Szenarioklasse.....	65
Abbildung 22: Datenbanktabellen der Kombinationsebene Szenario	68
Abbildung 23: Applikationsschnittstelle in AIMSUN [TSS05b]	74
Abbildung 24: Betriebskoppelungen von AIMSUN und verkehrstelematischem Prüfstand	75
Abbildung 25: Schnittstellen zu externen Programmen	78
Abbildung 26: Modelliertes Verkehrsnetz von Hannover	84
Abbildung 27: Prozentuale Aufteilung der 24h-Verkehrsnachfrage über den Tag	85
Abbildung 28: Qualitätsindizes nach räumlich-zeitlichen Flächen [BOG03].....	91
Abbildung 29: Qualitätskennzahlen Beispiel 1: tatsächliches Verkehrereignis und rekonstruierte Verkehrsinformation stimmen überein.....	93
Abbildung 30: Qualitätskennzahlen Beispiel 2: tatsächliches Verkehrereignis und rekonstruierte Verkehrsinformation stimmen in zeitlicher Hinsicht überein	93
Abbildung 31: Qualitätskennzahlen Beispiel 3: tatsächliches Verkehrereignis liegt vollständig innerhalb der rekonstruierten Verkehrsinformation.....	94
Abbildung 32: Qualitätskennzahlen Beispiel 4: tatsächliches Verkehrereignis und rekonstruierte Verkehrsinformation stimmen nicht überein, weder Überlappung in zeitlicher noch in räumlicher Hinsicht.....	94
Abbildung 33: Qualitätskennzahlen Beispiel 5: komplexes, tatsächliches Verkehrereignis und rekonstruierte Verkehrsinformation.....	95
Abbildung 34: Minimale, durchschnittliche und maximale Erkennungsrate für LoS F am Beispiel der Szenarioklasse Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren im zentralen Kommunikationsfall für die Verkehrsnachfrage von 8:30 Uhr bis 9:30 Uhr.....	108

Abbildung 35: Qualitätskennzahlen der Szenarioklasse Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren im zentralen Kommunikationsfall für die Verkehrsnachfrage von 8:30 Uhr bis 9:30 Uhr..	109
Abbildung 36: Qualitätskennzahlen der Szenarioklasse Frequenzdomänenverfahren im zentralen Kommunikationsfall für die Verkehrsnachfrage von 6:30 Uhr bis 7:30 Uhr.....	113
Abbildung 37: Qualitätskennzahlen der Szenarioklasse Durchschnittsgeschwindigkeitsverfahren im dezentralen Kommunikationsfall über WLAN, Verkehrsnachfrage von 6:30 Uhr bis 7:30 Uhr.....	115
Abbildung 38: Verkehrsnetzabdeckung Gesamtnetz und befahrenes Netz in den Verkehrsnachfragen 6:30 Uhr bis 7:30 Uhr und 8:30 Uhr bis 9:30 Uhr.....	116
Abbildung 39: Kostenmenge fahrzeugseitige Menge zentral versendeter Nachrichten gemittelt über die Verkehrsnachfragen von 6:30 Uhr bis 7:30 Uhr, von 7:30 Uhr bis 8:30 Uhr und von 8:30 Uhr bis 9:30 Uhr	117
Abbildung 40: Kostenmenge Summe fahrzeugseitige Menge zentral versendeter Nachrichten, Kostenmenge zentralseitige Menge empfangener Nachrichten und Kostenmenge Menge übertragener Nachrichten im Vergleich für die Verkehrsnachfrage von 8:30 Uhr bis 9:30 Uhr.....	118
Abbildung 41: Differenz der Nachrichtensummen in den Verkehrsnachfragen 6:30 Uhr bis 7:30 Uhr und 8:30 Uhr bis 9:30 Uhr.....	119
Abbildung 42: Standardabweichungen der durchschnittlichen Erkennungsrate in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate für die Verkehrsnachfrage von 6:30 Uhr bis 6:45 Uhr.....	120
Abbildung 43: Standardabweichungen der durchschnittlichen Erkennungsrate in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate für die Verkehrsnachfrage von 8:30 Uhr bis 8:45 Uhr.....	121
Abbildung 44: Standardabweichungen der durchschnittlichen Falschalarmrate in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate für die Verkehrsnachfrage von 6:30 Uhr bis 6:45 Uhr.....	122
Abbildung 45: Standardabweichungen der durchschnittlichen Falschalarmrate in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate für die Verkehrsnachfrage von 8:30 Uhr bis 8:45 Uhr.....	123
Abbildung 46: Standardabweichung der durchschnittlichen zeitlichen Genauigkeit in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate für die Verkehrsnachfrage von 6:30 Uhr bis 6:45 Uhr.....	124
Abbildung 47: Standardabweichungen der durchschnittlichen zeitlichen Genauigkeit in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate für die Verkehrsnachfrage von 8:30 Uhr bis 8:45 Uhr.....	124
Abbildung 48: Standardabweichungen der durchschnittlichen räumlichen Genauigkeit in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate für die Verkehrsnachfrage von 6:30 Uhr bis 6:45 Uhr.....	125
Abbildung 49: Standardabweichungen der durchschnittlichen räumlichen Genauigkeit in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate für die Verkehrsnachfrage von 8:30 Uhr bis 8:45 Uhr.....	126
Abbildung 50: Delta der mittleren Erkennungsrate bezogen auf die Simulationsdauer 15 Minuten	127
Abbildung 51: Delta der mittleren Falschalarmrate bezogen auf die Simulationsdauer 15 Minuten	128
Abbildung 52: Delta der mittleren zeitlichen Genauigkeit bezogen auf die Simulationsdauer 15 Minuten.....	129
Abbildung 53: Delta der mittleren räumlichen Genauigkeit bezogen auf die Simulationsdauer 15 Minuten.....	129

Abbildung 54: Standardabweichungen der durchschnittlichen Erkennungsrate in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate.....	130
Abbildung 55: Standardabweichungen der durchschnittlichen Falschalarmrate in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate.....	130
Abbildung 56: Standardabweichungen der durchschnittlichen zeitlichen Genauigkeit in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate.....	131
Abbildung 57: Standardabweichungen der durchschnittlichen räumlichen Genauigkeit in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate.....	132
Abbildung 58: Delta der mittleren Erkennungsrate bezogen auf das Abtastintervall 1 Sekunde, gemittelt über die Verkehrsnachfragen 6:30 Uhr bis 6:45 Uhr und 8:30 Uhr bis 8:45 Uhr.	133
Abbildung 59: Delta der mittleren Falschalarmrate bezogen auf das Abtastintervall 1 Sekunde, gemittelt über die Verkehrsnachfragen 6:30 Uhr bis 6:45 Uhr und 8:30 Uhr bis 8:45 Uhr.	134
Abbildung 60: Delta der mittleren zeitlichen Genauigkeit bezogen auf das Abtastintervall 1 Sekunde, gemittelt über die Verkehrsnachfragen 6:30 Uhr bis 6:45 Uhr und 8:30 Uhr bis 8:45 Uhr.....	134
Abbildung 61: Delta der mittleren räumlichen Genauigkeit bezogen auf das Abtastintervall 1 Sekunde, gemittelt über die Verkehrsnachfragen 6:30 Uhr bis 6:45 Uhr und 8:30 Uhr bis 8:45 Uhr.....	135
Abbildung 62: Durchschnittliche Erkennungsrate und Falschalarmrate für die Verkehrsnachfragen 6:30 Uhr bis 7:30 Uhr, 7:30 Uhr bis 8:30 Uhr und 8:30 Uhr bis 9:30 Uhr.....	136