

Makroskopische Verkehrsmodellierung mit der Einflussgröße Telematik

Eine Methodenarbeit und Beispielumsetzung mit
Cooperative Adaptive Cruise Control Systemen
im Güterverkehr

von Diplom-Ingenieur

Stephan Müller
aus Rostock

von der Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technische Universität Berlin

zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -
genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Volker Schindler
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Thomas Richter
Gutachterin:	Prof. Dr. rer. nat. habil. Barbara Lenz

Tag der wissenschaftliche Aussprache: 20. April 2012

Berlin 2012

D 83

Zusammenfassung

Den bestehenden Prognosen zufolge wird der Straßengüterverkehr in den kommenden Dekaden weiter zunehmen. Angesichts dessen und der aktuellen Situation, dass die Infrastruktur in vielen Teilen bereits an den Grenzen der Leistungsfähigkeit ist, wird nach neuen Lösungen jenseits von Neu- oder Ausbau der Infrastruktur gesucht. Telematik ist dafür ein Hoffnungsträger, dessen Leistungsspektrum in Wissenschaft und Industrie erforscht und weiterentwickelt wird. Die Politik unterstützt diesen Weg von der kommunalen Ebene bis zur Europäischen Kommission und fördert gezielt den Einsatz von Telematik.

Will man diese Förderung fokussiert umsetzen, also dort einsetzen, wo die besten Wirkungen in einem Zielfeld mit einem möglichst geringen Aufwand erreicht werden können, so müssen Wirkungen und Aufwand weitestgehend bekannt sein.

Ein etabliertes Werkzeug zur Ermittlung von Wirkungen unterschiedlicher Maßnahmen auf die Verkehrsnachfrage ist die makroskopische Verkehrsmodellierung. Mit ihrer Hilfe können Auswirkungen von Maßnahmen auf das Verkehrssystem für große Räume quantifiziert werden.

Telematik ist bisher nicht bzw. nur unzureichend genau in die makroskopische Verkehrsmodellierung integriert, obwohl sich seit Jahren zeigt, dass telematische Anwendungen im Verkehr verstärkt eingesetzt werden und den Verkehr beeinflussen (z. B. Fahrerassistenzsysteme, Flottenmanagementsysteme, Verkehrslenkungstelematik usw.).

Die vorliegende Dissertation hat zum Thema, die Wirkungen von Telematik in der makroskopischen Verkehrsmodellierung abzubilden. Es wurde dazu eine allgemeingültige Methode entwickelt, welche als Drei-Stufen-Prozess formuliert ist. In den Stufen werden exakte Wirkungen und Wirkungsparameter von Telematik in makroskopische Kennwerte transformiert und schließlich in der letzten Stufe des Verfahrens als Gesetzmäßigkeiten in das makroskopische Modell implementiert. Somit kann die Wirkung von Telematik, telematiksystemspezifisch und mit jeweils eigenen Wirkungsparametern modelliert werden.

Die Umsetzung der Methode konzentriert sich auf das Telematiksystem *Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC)*. Mit CACC können bis zu sieben Fahrzeuge elektronisch aneinander gekoppelt werden und fahren, bis auf das Führungsfahrzeug, vollautomatisch. Das System wird in der Dissertation bei Lkw über 12 Tonnen zulässigem

Gesamtgewicht und Sattelzugmaschinen eingesetzt. Andere Lkw und Pkw fahren konventionell.

Bei der Recherche der bereits bekannten und veröffentlichten Wirkungen von CACC zeigte sich, dass die Wirkungen von CACC auf den Verkehrsfluss beim Einsatz bei Lkw nicht publiziert sind. Die vorliegende Dissertation konzentriert sich daher auf die Wirkungen von CACC auf den Verkehrsfluss. Dazu wurde eine mikroskopische Modellierung des Autobahnverkehrs in VISSIM (PTV AG) durchgeführt. Die Simulationen mit Lkw-Anteilen von 0 bis 25 Prozent und CACC-Ausstattungsgraden von 0 bis 50 Prozent zeigten, dass sich die Kapazität von Autobahnen mit drei Richtungsfahrbahnen um bis zu 5,5 Prozent erhöhen lässt und sich die Reisegeschwindigkeit von Pkw um bis zu 6,5 Prozent steigern kann.

Diese Effekte wurden nach der entwickelten Methode in die makroskopische Modellierung über die Kenngröße *Reisezeit* integriert.

In makroskopischen Modellen wird die *Reisezeit* mit so genannten Capacity- Restraint-Funktionen (CR-Funktionen) berechnet. Da bisher noch keine für Deutschland gültige CR-Funktion veröffentlicht ist, bei der die Wirkungen des Lkw-Anteils auf den Verkehrsfluss berücksichtigt sind, war eine Grundvoraussetzung für die Integration von CACC-ausgestatteten Lkw in die CR-Funktion nicht gegeben. Aus diesem Grund wurde eine CR-Funktion entwickelt, die den Einfluss von Lkw auf den Verkehrsfluss abbildet. Diese erhöht die Qualität der makroskopischen Verkehrsmodellierung und kann nun z. B. auch in einer Verkehrsplanungssoftware wie VISUM (PTV AG) eingesetzt werden.

Diese CR-Funktion wurde anschließend weiterentwickelt, um zusätzlich zu den Wirkungen des Lkw-Anteils auf den Verkehrsfluss auch die Wirkungen von CACC-ausgestatteten Lkw abzubilden.

Es sind drei zentrale Innovationen durch das Promotionsvorhaben entstanden:

1. eine Methode zur Integration von Telematikwirkungen in die makroskopische Verkehrsmodellierung,
2. eine CR-Funktion, mit der die Pkw-Reisegeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Lkw-Anteil ausgegeben wird und
3. die Wirkungen auf den Verkehrsfluss von Cooperative Adaptive Cruise Control betriebenen Lkw.

Als wesentliche Erkenntnis der Arbeit für weiterführende wissenschaftliche Aufgaben kann die Nutzenfunktion in makroskopischen Verkehrsmodellen herausgestellt werden. Hier sind neben der Reisezeit weitere Nutzenfaktoren zu diskutieren, ggf. zu integrieren, funktional sinnvoll zu verbinden und geeignete Gewichtungsfaktoren zu entwickeln.

Telematik ist bereits heute und verstärkt in der Zukunft eine wichtige Einflussgröße auf das Verkehrssystem. Die systematische Integration von weiteren Telematikanwendungen in die makroskopische Verkehrsmodellierung ist mit der vorliegenden Arbeit als neues Forschungsfeld aufgetan und bedarf nun weiterer wissenschaftlicher Arbeit.

Abstract

According to current prognoses it is to be expected that goods transportation on roads will continue to increase over the next decades. Furthermore, infrastructure has reached its capacity limits in many parts. A simple reconstruction or upgrading of the infrastructure won't be enough; new solutions need to be found instead. Intelligent transport system seem to provide a valid approach for an alternative which is also supported by politicians of all levels, ranging from local representatives up to the European Commission, who are supporting the implementation of intelligent transport systems. For the moment though, the extent to which these systems can solve the issues and challenges is still a topic for scientific and industrial research as no large scale field tests could be run yet.

If we want to support the development and implementation of intelligent transport systems though, we need to understand their implications and effects in order to maximize their efficiency and effectiveness.

A well-established tool to identify the effect of different measures of traffic demand is macroscopic traffic demand modeling. With its help we can quantify the effect of measures of the traffic system for broad areas.

So far intelligent transport systems have not been fully integrated into macroscopic transport modelling, although the system has been used more frequently in recent years.

This dissertation will close this gap by modeling the effect of the intelligent transportation system transport. It will develop a method that is called the threestep-process. The first two steps deal with the exact effects and the effect parameter of the intelligent transportation system and transform them into specific macroscopic values. The last step implements the regularities into the macroscopic model, as the effects of intelligent transportation systems are depending on the parameters of each specific system.

The focus of the research is on the intelligent transportation system Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC). CACC connects up to seven vehicles electronically, with all but the leading truck being driven fully automatically. The trucks analysed have a maximum weight of 12t and are fitted with semi-trailers. All other vehicles are considered to be driven conventionally.

The analysis of so far identified and known effects of CACC reflects that little has been published on the effect of CACC on trucks. The impact of CACC on the traffic flow is therefore of central interest for this research. Therefore, in a first step, a microscopic model

of the highway traffic in the modeling software VISSIM (PTV AG) was used. Simulations of traffic with up to 25 percent of trucks and up to 50 percent of them equipped with CACC showed that the capacity of highways with three lanes can be increased by up to 5.5 percent. Also the speed of cars can be raised by up to 6.5 percent. These effects were integrated via the indicator travel time into the macroscopic modeling.

In a next step by the means of macroscopic modeling travel times were calculated with the help of the Capacity-Restraint-Function (CR-Function). Up to this point no CR-Function that includes the effects of the share of trucks on the traffic flow has been published for Germany. Therefore a new CR-Function is developed here that shows the influence of trucks on the traffic flow. By the means of this new CR-function it is possible to increase the quality of the macroscopic modeling transport dramatically. Furthermore, the development enables the use of a transportation planning software like VISUM (PTV AG). The new CR-Function is refined to not just show the effects of the share of trucks on the traffic flow, but also to show the effects of trucks using CACC.

As a consequence, the following three innovations are developed in this research:

1. a method to integrate the effects of the intelligent transportation system on the macroscopic traffic modeling,
2. a CR-Function that includes the vehicle cruising speed in dependence of the share of trucks of the entire traffic and
3. the inclusion of effects of CACC in heavy trucks on the traffic flow.

Already today intelligent transportation systems play an important role in transportation. Their role will increase in the future. The systematic integration of these intelligent transportation systems into the macroscopic modeling of transport done within this research is a valid approach to understanding the impact of these systems.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xiii
Tabellenverzeichnis	1
1. Ausführungen zum Forschungshintergrund und zum Forschungskonzept	3
1.1. Eingrenzung des Forschungsthemas	4
1.2. Aufbau der Arbeit	5
2. Analyse des Untersuchungsgegenstandes Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC)	11
2.1. Kontextwissen zu Telematik	11
2.2. Entwicklungstrend von Telematik	17
2.3. Beschreibung des Systems: Adaptive Cruise Control (ACC)	19
2.4. Wirkungen von ACC	22
2.5. Beschreibung des Systems: Cooperative Adaptive Cruise Control	27
2.6. Wirkungen von CACC	32
2.7. Zusammenfassung zu den Wirkungen von CACC	40
2.8. Fazit zur Telematik	42
3. Die Grundlagen der makroskopischen Verkehrsmodellierung	45
3.1. Grundlagen der Verkehrsangebotsmodellierung	46
3.2. Grundlagen der Verkehrsnachfragemodellierung	52
3.2.1. Verkehrserzeugung	53
3.2.2. Zielwahl	54
3.2.3. Verkehrsmittelwahl	55
3.2.4. Umlegung	56
3.3. Rückkopplung von Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodell	57
3.4. Fazit zur makroskopischen Verkehrsmodellierung	60

4. Methode zur Integration von Telematikwirkungen in die makroskopische Verkehrsmodellierung	61
4.1. Bestehende Ansätze zur Integration von Telematik in die makroskopische Verkehrsmodellierung	61
4.2. Herleitung und Beschreibung der Methode	63
4.3. Operationalisierung der Methode am Beispiel von CACC	65
4.4. Diskussion der Methode für das Anwendungsbeispiel CACC	74
4.5. Fazit zur Integration der Wirkungen von CACC in die makroskopische Modellierung	76
5. Exemplarische Bestimmung der Widerstandskomponente Reisezeit	77
5.1. Grundlagen der Reisezeitberechnung in makroskopischen Verkehrsmodellen	77
5.1.1. Das Fundamentaldiagramm der makroskopischen Verkehrskenngrößen	77
5.1.2. Das q-v-Diagramm	80
5.1.3. Anforderungen an CR-Funktionen	82
5.1.4. Gängige CR-Funktionen	83
5.2. CR-Funktion mit Lkw-Anteil	87
5.3. Grundkonzept der CR-Funktion für die Wirkung von CACC	91
6. Methode der Datenerhebung	93
6.1. Aspekte des mikroskopischen Modells zur Datenerhebung	93
6.1.1. Auswahl des Modells	94
6.1.2. Beschreibung des Fahrzeugfolgeverhaltens in VISSIM	95
6.1.3. Basisdaten für die Modellierung des Autobahnverkehrs in VISSIM .	103
6.1.4. Eigenschaften der Fahrzeuge	104
6.1.5. Kalibrierung des Modells	109
6.1.6. Parameter des intelligenten Lkw	112
6.1.7. Definition der Simulationsszenarien	115
6.1.8. Beschreibung der generierten Daten und Ergebnissdarstellung	116
6.1.9. Kritische Würdigung der Wirkungen von CACC auf den Verkehrsablauf	122
7. Integration der Wirkungen von CACC in die CR-Funktion	125
8. Zusammenfassung der Erkenntnisse und wissenschaftlicher Ausblick	131
A. Grafische Einstellung von Parametern in VISSIM	137

B. Grafiken zu den Ergebnissen der Kalibrierung	139
C. Parameter der CR-Funktion unter Berücksichtigung des Lkw-Anteils	143
D. Funktionsparameter der CR-Funktion mit CACC-Effekten	147
Literaturverzeichnis	151

Abbildungsverzeichnis

1.1. Systematischer Ablauf der Arbeit	9
2.1. Telematik als Prozess	13
2.2. Aktive FAS in Nutzfahrzeugen nach Eingriffsbereich und -tiefe	19
2.3. Fahrsituationen auf Autobahnen für Lkw	21
2.4. Nötige technische Systeme am Fahrzeug für CACC	28
2.5. Skizze des CACC-Einsatzes in einem Konvoi	30
2.6. Kraftstoffersparnis bei Lkw-Tandemfahrten gegenüber Einzelfahrten	34
2.7. Durchschnittliche Geschwindigkeiten bei verschiedenen Szenarien	38
3.1. Knotenorientierte Netzbeschreibung (a) und Abbiegevorgänge am Knoten i3 (b)	47
3.2. Kantenorientierte Netzbeschreibung.	47
3.3. Beispielhafte Alternativen für einen Weg	49
3.4. CR-Funktion vom Typ BPR	52
3.5. Bewertungsfunktion für Widerstände zwischen einer Relation	55
3.6. Rückkopplungsprozess Verkehrsangebot und -nachfrage	59
4.1. Methode zur Integration von Telematik in die makroskopische Verkehrsmo- dellierung	66
4.2. Ursache-Wirkungs-Prinzip für die mikroskopischen Wirkungen von CACC .	68
4.3. Makroskopische Kennwerte zu den Wirkungen von CACC	70
4.4. Modellerweiterung um die CACC-Wirkungen	74
5.1. Werktäglicher DTV von Lastkraftfahrzeugen und Omnibussen auf Bundes- autobahnen und -straßen	78
5.2. Das Fundamentaldiagramm	79
5.3. Skizziertes Mehr-Bereichs-Modell	81
5.4. CR-Funktion Real vs. Modell	83

5.5. Funktionsverlauf Yun, Wade, Lamb und Wu bei HBS-Daten Lkw-Verkehr	86
5.6. INRETS-Funktionsverlauf bei HBS-Daten einer dreistreifigen BAB	88
5.7. CR-Funktionsverlauf bei HBS-Daten einer dreistreifigen BAB	89
5.8. CR-Funktionsverlauf bei HBS-Daten einer zweistreifigen BAB	90
6.1. VISSIM-Parameter für freies Fahren	98
6.2. VISSIM-Parameter bei der Annäherung	98
6.3. VISSIM-Parameter bei der Folgefahrt	99
6.4. Fahrzeugfolgmodell von Wiedemann	100
6.5. Dreidimensionale Ansicht des simulierten Autobahnabschnitts	104
6.6. Fahrzeugmodelle in VISSIM	105
6.7. Lkw-Anteil sowie der Anteil von Sattelzugmaschinen und Lkw über 12 t zGG auf Bundesstraßen	108
6.8. Dichtefunktion des Gewichts von Fahrzeugen über 3,5 Tonnen Nutzlast	109
6.9. Dichtefunktion der Leistung von Fahrzeugen über 3,5 Tonnen Nutzlast	110
6.10. Verkehrsstärke-Dichte-Diagramme der VISSIM- und HBS-Daten	113
6.11. Länge und Wahrscheinlichkeit der Verbände	115
6.12. Szenarienbildung für die Messdaten	116
6.13. Q-v-Daten bei 10 Prozent Lkw-Anteil und 50 Prozent CACC-Anteil	117
6.14. Q-v-Diagramm bei 10 Prozent Lkw-Anteil und verschiedenen CACC-Anteilen	118
6.15. Auswertungsprinzip für die Wirkungen von CACC	119
7.1. Parameter α in Abhängigkeit vom CACC-Anteil für verschiedene Lkw- Anteile	126
7.2. Entwicklung eines durchschnittlichen Kurvenverlaufes	127
7.3. Dreidimensionaler Term für α in der CR-Funktion	128
7.4. CR-Funktion mit unterschiedlichen CACC- und Lkw-Anteilen	129
A.1. Verteilung der Wunschgeschwindigkeit von Pkw und Lkw in VISSIM	137
A.2. Verteilung der Wunschbeschleunigung von Pkw und Lkw in VISSIM	137
A.3. Verteilung der Wunschverzögerung von Pkw und Lkw in VISSIM	138
A.4. Verteilung der Maximalbeschleunigung von Pkw und Lkw in VISSIM	138
A.5. Verteilung der Maximalverzögerung von Pkw und Lkw in VISSIM	138
B.1. Q-v Diagramm für 100 Prozent Pkw	139
B.2. Q-k Diagramm für 100 Prozent Pkw	139

B.3. Q-v und q-k Diagramm mit 10 % Lkw und 0 % Streckenneigung	140
B.4. Q-v und q-k Diagramm mit 10 % Lkw und 1 % Streckenneigung	140
B.5. Q-v und q-k Diagramm mit 10 % Lkw und 2 % Streckenneigung	140
B.6. Q-v und q-k Diagramm mit 20 % Lkw und 0 % Streckenneigung	141
B.7. Q-v und q-k Diagramm mit 20 % Lkw und 1 % Streckenneigung	141
B.8. Q-v und q-k Diagramm mit 20 % Lkw und 2 % Streckenneigung	141
C.1. Funktionaler Zusammenhang für den Parameter α	144
C.2. Funktionaler Zusammenhang für den Parameter β	144
C.3. Funktionaler Zusammenhang für den Parameter γ	145
D.1. Variation des Parameter α bei unterschiedlichem CACC-Anteil	148
D.2. Variation des Parameter β bei unterschiedlichem CACC-Anteil	148
D.3. Variation des Parameter γ bei unterschiedlichem CACC-Anteil	149

Tabellenverzeichnis

2.1. Vermeidungspotenzial von Unfällen durch CA-Einsatz	33
2.2. Durchschnittliche Steigerungen der Kapazität durch CA-Einsatz	36
3.1. Widerstand von Alternativen mit verschiedenen Nutzenfunktionen	50
5.1. CR-Funktionen (für Strecken) nach Funktionstyp und Bereichsanzahl	84
6.1. Wirkungen der VISSIM-Basisparameter auf die Kapazität einer Strecke . .	101
6.2. Fahrzeuglängen und -anteile nach Pkw und Lkw	106
6.3. Fahrzeuglängen der VISSIM-Fahrzeugmodelle	107
6.4. VISSIM-Verhaltensparameter von Pkw und Lkw auf einer dreispurigen Autobahn	112
6.5. Kapazitätserweiterung von Autobahnen durch CACC-ausgestattete Lkw . .	119
6.6. Geschwindigkeitssteigerung auf Autobahnen durch CACC-ausgestattete Lkw	120

1. Ausführungen zum Forschungshintergrund und zum Forschungskonzept

Seit Jahrzehnten steigen das Verkehrsaufkommen und die Verkehrsleistung auf der Straße (Personen- und Güterverkehr) an [91]. Einschlägige Prognosen gehen auch für kommende Dekaden von einem Wachstum aus [80; 52; 62]. Der überwiegende Anteil des Verkehrs findet auf der Straße statt. Dadurch ist die Straßenverkehrsinfrastruktur in vielen Teilen überlastet und die Mobilität der Gesellschaft und Wirtschaft eingeschränkt.

Eine Kapazitätsausweitung der Infrastruktur durch Neu- und Ausbau war lange Zeit die praktizierte Lösung, um die Verkehrsqualität auf den Straßen zu verbessern. Weil dieser Lösungsweg „zur Zeit aus finanziellen, gesellschaftlichen und politischen Gründen nur in begrenztem Umfang durchführbar ist“ [48], sollen zusätzlich organisatorische Maßnahmen ergriffen und somit infrastrukturelle Engpässe aufgelöst werden [70; 48].

Ende der 1980er Jahre wurde das Potenzial erkannt, mit Hilfe von Informations- und Kommunikationstechnologien (IuK) in Form von Telematikanwendungen den Verkehr effizienter zu gestalten. Zu den Wirkungspotenzialen von Telematik gehören, so der allgemeine Konsens (siehe bspw. [86; 44; 72; 119]), eine erhöhte Leistungsfähigkeit der Infrastruktur, verbesserte Fahrzeugauslastungen sowie eine gesteigerte Interoperabilität der Verkehrsträger. Neben diesen Effekten verstärkt Telematik die Sicherheit und verringert die negativen Umweltfolgen des Verkehrs [86].

Mit steigender Leistungsfähigkeit der Technologien wurde und wird Telematik immer mehr in das Verkehrswesen integriert [48]. Es existiert der politische Wille, die Einführung von Telematik europaweit zu fördern und Systemschnittstellen international zu koordinieren [70]. Der Trend entspricht einer (Teil-)Automatisierung der Betriebsabläufe im Verkehr. Dies geschieht beispielsweise durch Fahrerassistenzsysteme, adaptive Lichtsignalanlagensteuerungen oder die Verknüpfung von Fahrzeug-Statusinformationen mit anderen Fahrzeugen, der Infrastruktur, mit Datenbanken und Softwareanwendungen.

Auf Grund des bestehenden Durchdringungsgrades, der forcierten Implementierung von Anwendungen [50; 70] und der Wirkungen von Telematik, ist die *neue Intelligenz* im Verkehrssystem bereits heute eine eigenständige Rahmenbedingung im Verkehrswesen. Diese muss bei der Verkehrsplanung berücksichtigt werden, denn „unterschiedliche Wirkungen von Telekommunikation und Telematik haben (...) Veränderungen der räumlichen und zeitlichen Verkehrsnachfrage (Fahrleistung, Streckenbelastung) und des Verkehrsablaufs (Geschwindigkeiten, Emissionsverhalten, Unfallraten) zur Folge“ [58].

Ein wesentliches Analyseinstrument in der Verkehrsplanung ist heute die makroskopische Verkehrsmodellierung. Mit ihrer Hilfe werden Fragen zu Wechselwirkungen von veränderten Rahmenbedingungen im Verkehrssystem, z. B. als Folge verkehrspolitischer oder technischer Maßnahmen, beantwortet. Die Rahmenbedingungen des zu untersuchenden Verkehrssystems werden dabei als Parameter in deterministischer oder stochastischer Form in das Modell implementiert. Veränderungen bei den Parametern liefern Aussagen zum erwarteten Verhalten des modellierten Systems. Als heute wie zukünftig prägende Rahmenbedingung des Verkehrssystems muss Telematik in Verkehrsmodellen berücksichtigt werden.

Bisher ist Telematik noch nicht in die makroskopische Verkehrsmodellierung implementiert, wie es beispielsweise bei mikroskopischen Modellen der Fall ist (siehe [66; 109]). In diesem Status ist die makroskopische Modellierung nicht in der Lage, zukünftige Entwicklungen des Verkehrssystems unter Berücksichtigung der sich abzeichnenden technischen Evolution in Form von Telematik abzubilden.

Die vorliegende Dissertation greift dieses Thema auf, um einen Beitrag zur Integration der neuen Rahmenbedingung des Verkehrssystems *Telematik* in die makroskopische Modellierung zu leisten.

1.1. Eingrenzung des Forschungsthemas

Telematik gliedert sich in viele unterschiedliche Anwendungen, technologische Konzepte und Wirkungsebenen. Sie ist derzeit nicht vollständig in ihren Einzelwirkungen und auch nicht in ihren interdependenten Wirkungen wissenschaftlich aufgearbeitet. Deshalb konzentriert sich die Dissertation auf ein Telematiksystem: Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC). Dieses System ermöglicht die elektronische Koppelung von Fahrzeugen zu Verbänden, wobei auch die Fahrzeugführung vom System übernommen wird [42].

CACC ist eine Weiterentwicklung des gut erforschten und auf dem Markt verfügbaren ACC-Systems (Adaptive Cruise Control) [1; 105]. Derzeit ist CACC in der Entwicklungsphase, technisch jedoch bereits umgesetzt und getestet [106; 55; 113]. Die Relevanz von CACC ergibt sich sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr. Laut aktuellem Forschungsprojekt SARTRE ist der Einsatz von CACC ein mittelfristig realistisches Szenario (etwa 10 Jahre) [113]. Die vorliegende Arbeit fokussiert den Einsatz von CACC bei Lkw mit über 12 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht und Sattelzugmaschinen.

Forschungsziel ist, **ein Konzept zur Integration der Wirkungen von Telematik in die makroskopische Modellierung zu entwickeln und am Beispiel von Cooperative Adaptive Cruise Control umzusetzen.**

Die vorliegende Untersuchung ist eine qualitative Arbeit, soweit sie das Konzept und die Umsetzungsmethode zur Integration von Telematik-Wirkungen anbietet. Eine quantitative Arbeit ist sie dahingehend, dass sie die erarbeitete Methode am Beispiel von CACC im Güterverkehr auf dreispurigen Autobahnen anwendet. Die Übertragung der Methode auf andere Telematiksysteme und auf andere Planungsräume ist möglich.

Die vorliegende Arbeit kann durch die Methode selbst und auch durch deren Umsetzung am Beispiel von CACC zu folgenden zentralen wissenschaftlichen Innovationen beitragen:

- Formulierung einer Methode zur Integration von Telematik-Wirkungen in die makroskopische Verkehrsmodellierung,
- Entwicklung einer Capacity-Restraint-Funktion (CR-Funktion) mit Lkw-Anteil,
- Ermittlung der Wirkungen auf den Verkehrsfluss von bis zu sieben elektronisch aneinander gekoppelten Lkw.

1.2. Aufbau der Arbeit

Im Folgenden werden die Intentionen der einzelnen Kapitel und deren Inhalte aufgeführt. Der somit geschaffene Leitfaden soll das Verständnis zur Vorgehensweise der Untersuchung erhöhen.

Das Kapitel 2 widmet sich der Beschreibung des Untersuchungsgegenstandes. Dazu wird zuerst das Kontextwissen zu CACC aus der bestehenden Literatur dargestellt. In Kapitel

2.1 wird der Begriff Telematik definiert, die existierenden Systeme werden klassifiziert und CACC darin eingeordnet. Teil des Kontextwissens ist die Diskussion von Telematik als Spannungsfeld im Güterverkehr zwischen der Angebotsseite, bestehend aus Forschung, öffentlichen Einrichtungen sowie Industrie, und der Nachfrageseite, den Logistikdienstleistern und Transportunternehmen. Ebenfalls werden die aktuellen Entwicklungen und erwarteten Trends von Telematik dargestellt, um einerseits den Untersuchungsgegenstand umfassend zu beschreiben und andererseits die Bedeutung des Themas darzulegen (siehe Kapitel 2.2). Nach der einführenden Darstellung des Themas *Telematik* wird in Kapitel 2.3 das bereits am Markt verfügbare Vorgänger-System von CACC, Adaptive Cruise Control (ACC), beschrieben. Dies geschieht vor dem Hintergrund, dass viele Funktionalitäten von CACC auf diesem System basieren, auch wenn deutliche Erweiterungen und neue technische Anforderungen von CACC gegenüber ACC bestehen. Auch die Wirkungsmechanismen sind sich sehr ähnlich.

Die Wirkungen von ACC sind in Kapitel 2.4 aufgeführt. Die Beschreibung der Wirkungen konzentriert sich auf jene Untersuchungen, welche den Fokus auf ACC-Wirkungen im Güterverkehr hatten.

Es folgen in Kapitel 2.5 und 2.6 die Ausführungen zum System CACC und dessen Wirkungen. Die Wirkungen wurden aus der bestehenden Literatur zusammengetragen und werden bei der Umsetzung der Methode berücksichtigt.

Die in Kapitel 2.7 gegebenen Zusammenfassungen zu Telematik, ACC und CACC erleichtern es, die wesentlichen Inhalte aus Kapitel 2 in die weitere Untersuchung zu überführen.

Im Kapitel 3 wird die makroskopische Modellierung erläutert. Dabei wird der Sachstand nach Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodellierung differenziert dargestellt. Auf mathematische Beweise und detaillierte Beschreibungen von Modellierungskonzepten wurde bewusst verzichtet. Vielmehr geht es in den Kapiteln 3.1 bis 3.3 um die Erläuterung des Zusammenhangs verschiedener Sub-Modelle und deren Parameter in der makroskopischen Verkehrsmodellierung.

Die Ausführungen von Kapitel 2 und 3 werden im Kapitel 4 zusammengeführt. In diesem wird das Konzept zur Integration der Wirkungen von CACC in die makroskopische Modellierung abgeleitet und beschrieben. Neben der allgemeingültigen Darstellung des Ansatzes erfolgt in Kapitel 4.3 auch die Prüfung, ob das Konzept methodisch und inhaltlich richtig ist. Die in der Aufgabenstellung geforderte Konkretisierung der Methode wird in

Kapitel 4.2 vorbereitet und umgesetzt. Die weitere Untersuchung wird auf die CACC-Wirkungen *Reisezeit* und *Kapazitätserweiterung* eingeschränkt.

In der Kapazitätsbeschränkungs-Funktion (CR-Funktion), einem speziellen Sub-Modell der makroskopischen Modellierung, wird der Ansatz zur Modellierung der durch die Wirkung von CACC veränderten *Reisezeit* und *Kapazität* weiterverfolgt. Eine umfassende Abhandlung zum verkehrstechnischen Hintergrund von CR-Funktionen, zu mathematischen und verkehrsabbildenden Anforderungen sowie eine detaillierte Beschreibung von - für die vorliegende Untersuchung - relevanten CR-Funktionen wird durch die Kapitel 5.1.1 bis 5.1.4 abgedeckt. Nach einer Diskussion der Eigenschaften von verschiedenen Funktionstypen erfolgt die Auswahl einer geeigneten Funktion zur Beantwortung der Forschungsfrage. Diese Funktion wird in Kapitel 5.10 an die neuen Anforderungen, die CACC-Wirkungen, angepasst. Dazu gehört auch die Entwicklung einer neuen, eigenen CR-Funktion, in welcher der Zusammenhang zwischen der Pkw-Geschwindigkeit und dem Lkw-Anteil auf einer Strecke berücksichtigt wird.

Auf CR-Funktionen wird inhaltlich vertieft eingegangen, weil sich als Ergebnis der Literaturrecherche herausgestellt hatte, dass Reisezeiteinflüsse von CACC noch nicht bestimmt worden sind, so dass sie adäquat in die makroskopische Modellierung integrierbar gewesen wären. Reisezeit ist jedoch einer der wichtigsten Parameter in der Modellierung. Eine Untersuchung von Reisezeitwirkungen ist deshalb explizit erforderlich und wird im empirischen Teil der Dissertation durchgeführt (siehe Kapitel 6 und 7).

Kapitel 6 enthält die Beschreibung der Methode, mit der die Effekte von CACC auf die Reisezeit ermittelt wurden. Als Erhebungsmethode wurde eine mikroskopische Simulation des Verkehrsablaufes mit der Software VISSIM eingesetzt, um durch Simulationen des Verkehrsverhaltens, mit und ohne CACC-System, die erforderlichen verkehrstechnischen Daten zu ermitteln. VISSIM und der Versuchsaufbau werden hier beschrieben. Kapitel 6.1.8 beinhaltet die generierten Daten und die Darstellung der Ergebnisse bzgl. der Wirkungen von CACC. Eine kritische Würdigung der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 6.1.9.

Die Datenauswertung, abgehandelt in Kapitel 7, beschreibt die Integration der Wirkung von CACC auf die Reisezeit in die makroskopische Verkehrsmodellierung. Dazu werden funktionale Zusammenhänge zwischen dem Lkw-Anteil, dem CACC-Ausstattungsgrad und der Pkw-Geschwindigkeit hergestellt und diese in die vorbereitete CR-Funktionen überführt.

Damit konnten die Wirkungen von CACC in der makroskopischen Modellierung erfolgreich abgebildet werden. Der Aufbau der Arbeit und die Zusammenhänge der Kapitel sind in Abbildung 1.1 zusammengefasst.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Kapitel 8, der die Ergebnisse der vorliegenden Dissertation in den Forschungskontext einordnet und den weiteren Forschungsbedarf herausstellt.

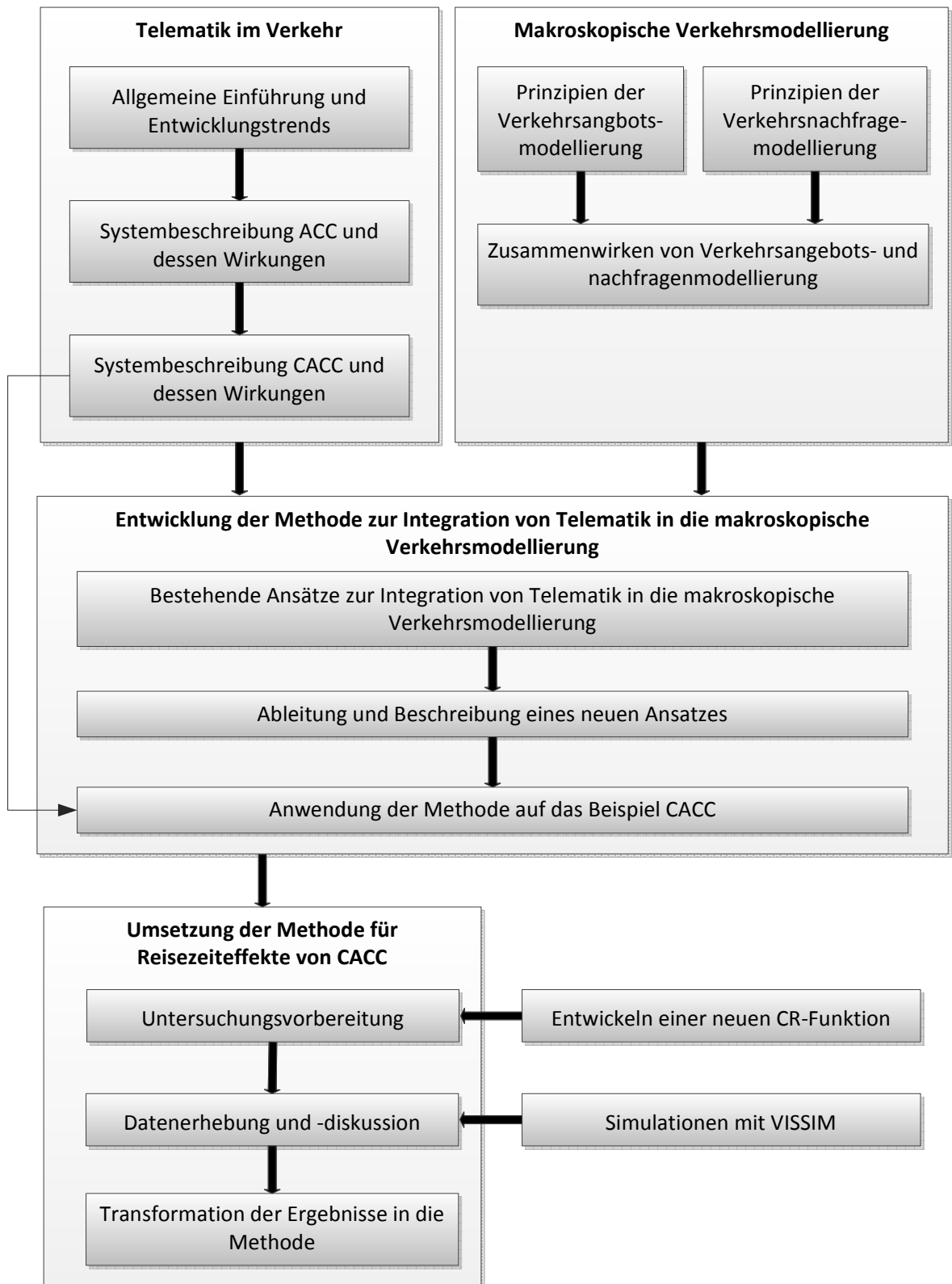


Abbildung 1.1.: Systematischer Ablauf der Arbeit

2. Analyse der Untersuchungsgegenstandes CACC

Das Themenfeld *Telematik* wird in den Kapiteln 2.1 und 2.2 aufgespannt, indem als Kontextwissen zum Untersuchungsgegenstand CACC grundsätzliche System-Eigenschaften von Telematik dargestellt und diskutiert werden. Anschließend werden die Telematiksysteme ACC und CACC sowie deren Wirkungen beschrieben. ACC ist der technologische Vorgänger von CACC und bereits in zahlreichen Arbeiten untersucht worden. Daher lässt sich methodisches Vorwissen für CACC übernehmen.

2.1. Kontextwissen zu Telematik

Telematik ist ein Schlagwort im Verkehrswesen, das mit intelligent steuernden Technologien assoziiert wird. Jedoch ist die Definition des Begriffes Telematik in der Literatur nicht präzise. Oft wird er als Kunstwort aus *Telekommunikation* und *Informatik* definiert oder es erfolgt eine Gleichsetzung von Telematik mit konkreten Anwendungen, wie beispielsweise dem Flottenmanagement oder der dynamischen Zielführung (siehe dazu beispielsweise [81; 86; 49; 119; 93; 48]). Aus den folgenden Ausführungen zu Charakteristika von Telematik wird anschließend eine Definition abgeleitet.

Erarbeitung einer Definition von Telematik:

Als Ausgangspunkt für die Ableitung einer Definition soll erörtert werden, wie Telematik in den oft gekoppelten Begriff Informations- und Kommunikationstechnologien (IuK) einzuordnen ist.

SUSSMAN beschreibt ITS (**I**ntelligent **T**ransport **S**ystem), wie Telematik im englischen Sprachraum genannt wird, wie folgt:

„ITS combines high technology and improvements in information, communication, sensors, and advanced mathematical methods with the conventional world of surface transportation infrastructure.“[103]

Für diese Kombination von Technologien und Methoden mit dem konventionellen Verkehr arbeitet Telematik in drei Stufen: *Datenerfassung*, *Datenverarbeitung* und *Datenausgabe*. Die Datenübertragung verbindet die einzelnen Stufen [104].

Die Datenerfassung umfasst das Erheben von relevanten Indikatoren eines Ausgangszustandes in den Bereichen verkehrstechnische Daten (z. B. Verkehrsstärke), Umfelddaten (z. B. Wetter) und betriebstechnische Daten (z. B. Temperatur an einem Fahrzeugbauteil). Im weiteren Prozessablauf von Telematik werden die Daten-Werte übertragen und verarbeitet. Der Verarbeitungsprozess kann mehrere Ebenen durchlaufen. Zwei Ebenen wären beispielsweise die Rohdatenerfassung durch einen Anbieter und die anschließende Weiterverarbeitung zu Informationen mit Handlungsempfehlungen durch eine Verkehrsmanagementzentrale. Im Verarbeitungsprozess sind Aufgaben der Datenprüfung, evtl. nötige Ersatzwertverfahren, Interpolationen, Datenhaltung und die Berechnung des Ausgabewertes, enthalten [104; 18].

Telematik nutzt somit Informations- und Kommunikationstechnologien (IuK) für die eigene Zweckerfüllung. IuK ist technologisch vielfältig, z. B. ein Telefon, ein einzelner PC, eine Festplatte, ein analoges Radio etc. und ebenfalls Telematik. Damit kann Telematik als Teilbereich der IuK bezeichnet werden.

Was zeichnet das System Telematik darüber hinaus aus?

Telematik hat immer ein Wirkungsziel, an welches die Datenausgabe in Form von Informationen an Menschen (z. B. zu Reisezeiten, Kosten, Verkehrslage) oder von Steuerungen von Maschinen erfolgt (z. B. Geschwindigkeitsregelung, Spursperrung, Beschleunigen oder Bremsen in einem Fahrerassistenzsystem). Steuerungen haben einen verbindlichen Charakter, Informationen nicht. Somit kann sich bei der reinen Information durch Telematik das Verhalten des Wirkungsziels ändern oder bei Ablehnung unverändert bleiben. Ändert sich das Verhalten, ist eine rückkoppelnde Veränderung des Ausgangszustandes die Folge (siehe Abbildung 2.1).

Ausgehend von dieser System-Beschreibung wird als Definition von Telematik Folgendes vorgeschlagen:

Telematik ist ein Prozess mit den Stufen Datenerfassung, Datenverarbeitung und Datenausgabe, welcher mit Sensoren, Informations- und

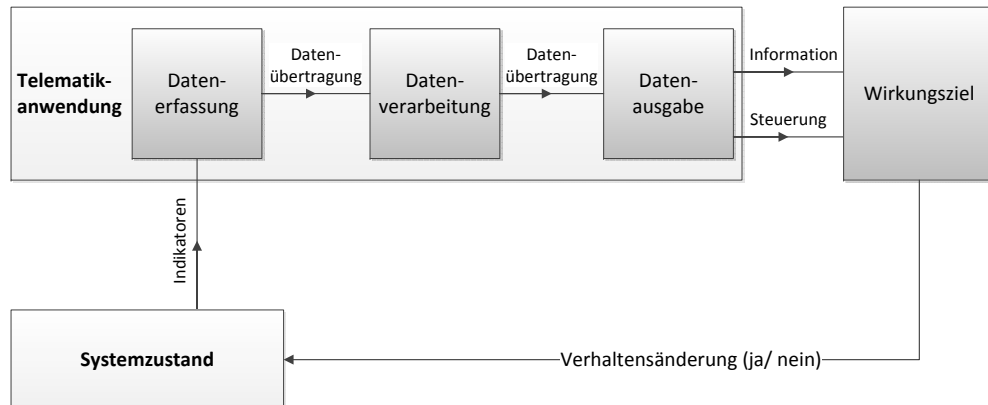


Abbildung 2.1.: Telematik als Prozess

Kommunikationstechnologien sowie mathematischen Methoden ein Wirkungsziel erreicht. Das Wirkungsziel von Telematik wird mit Informationen oder Steuerung angesprochen.

Im Verkehrswesen wird Telematik in sehr unterschiedlichen Prozessen, mit unterschiedlicher technologischer Qualität und unterschiedlichem Automatisierungsgrad eingesetzt. Es gibt noch keine allgemeingültige Gliederung der Anwendungen, sondern eine Vielzahl von Bezeichnungen und unterschiedlichen Klassifikationsansätzen [44; 107; 72]. In der Literatur nimmt die Einteilung von SUSSMAN zur Darstellung des Anwendungsspektrums von Telematik eine zentrale Rolle ein [103]:

Advanced Traffic Management Systems (ATMS):

Bei diesen Systemen werden durch intelligentes Management die verschiedenen Funktionen der Infrastruktur unterstützt. Beispielsweise werden Stauvoraussagen, überregionale Routenvorschläge und adaptive Geschwindigkeitsanzeigen mit Echtzeit-Daten umgesetzt.

Advanced Traveller Information Systems (ATIS):

ATIS-Systeme stellen Informationen für Fahrer und deren Endgeräte zur Verfügung. Unfallwarnungen, Witterungsbedingungen, Verkehrsbedingungen etc. könnten zu individuellen Routenvorschlägen verarbeitet werden. Die Informationen können pre-Trip (vor der Fahrt) und/oder on-Trip (während der Fahrt) von stationären oder mobilen Endgeräten empfangen und zu Handlungsempfehlungen verarbeitet werden.

Advanced Vehicle Control System (AVCS):

AVCS unterstützt den Fahrer bei der Kontrolle des Fahrzeugs und/oder von Verkehrssituationen. Beispiele für AVCS sind Spurhalte-Assistenten oder Notbremssysteme. Adaptive Cruise Control-Systeme (ACC) und Cooperative Adaptive Cruise Control-Systeme (CACC) sind ebenfalls dieser Kategorie zugeordnet. ACC und CACC, als expliziter Untersuchungsgegenstand, werden in dieser Arbeit detaillierter in den Kapiteln 2.3 und 2.5 behandelt. Derzeit sind AVCS-Systeme noch überwiegend stand-alone-Applikationen. Das heißt, einzelne Fahrzeuge werden mit Sensoren ausgestattet und unterstützen den Fahrer. Es sind aber bereits Konzepte ausgearbeitet und teilweise in der Testphase [71; 55; 113], bei denen die Kommunikation von Fahrzeug zu Fahrzeug sowie von Fahrzeugen zur Infrastruktur erfolgt.

Commercial Vehicle Operations (CVO):

Systeme der Kategorie CVO sind Telematik-Anwendungen, welche zur Erhöhung beziehungsweise Verbesserung der Produktivität, der Sicherheit, der Wirtschaftlichkeit, der Kontroll- und Reaktionsmöglichkeiten in der Logistik, bei Umschlagprozessen sowie während des Transportes eingesetzt werden. Warenwirtschaftssysteme, Dispositionsplanung, Laderaumoptimierung, Flottenmanagement und Track and Trace sind Beispiele solcher Systeme [72].

Advanced Public Transportation Systems (APTS):

Unter dem Begriff APTS-System fasst man Telematik zum Betrieb und zur Steuerung von öffentlichen Verkehrsmitteln zusammen. Zu dieser Kategorie werden beispielsweise die Betriebsleitzentralen gezählt, welche zur Steuerung von Betriebskonzepten der Infrastruktur (im Schienenverkehr) und der Flotten eingesetzt werden und verbreitet sind. Daten von und für Betriebsleitzentralen dienen auch dem Zugang und der Verbesserung von Reiseinformationen und der Verbindungssuche on-Trip und pre-Trip für Reisende (siehe ATIS).

Advanced Rural Transportation Systems (ARTS):

Im ländlichen Raum gibt es besondere Rahmenbedingungen, beispielsweise geringe Besiedlungsdichten und geringe finanzielle Ressourcen für ITS-Investitionen. Dennoch sind ITS-Systeme, wie Notfallsysteme und Systeme zur Bewältigung des Transitverkehrs, in diesen Gebieten wichtig.

Für den Güterverkehr haben CVO- und AVCS-Systeme eine besondere Relevanz. Commercial Vehicle Operation-Anwendungen sind Voraussetzungen in der Logistik, um die steigende Komplexität der Logistikdienstleistungen zu bewältigen sowie notwendige Wettbewerbsvorteile durch Effizienz und Diversifikation der Dienstleistung zu erreichen [72]. AVCS-Systeme erhöhen laut der aktuellen Literatur die Sicherheit und die Wirtschaftlichkeit des Transportes [68].

In einer Delphi-Studie stimmten 83 Prozent von 62 Experten folgender These zu: "Der durchgängige Einsatz telematischer Systeme zur Optimierung des physischen Warenverkehrs wird in Zukunft die Voraussetzung für ein erfolgreiches Auftreten von Transportdienstleistern am Markt sein." [114]

Der zukünftig notwendige sowie verstärkte Einsatz von Telematik in der Logistik und damit einhergehend die Marktentwicklungserwartungen für Telematik werden in der Literatur überwiegend positiv beschrieben. Telematik erfüllt einzel- und gesamtwirtschaftliche Ziele des Verkehrs- und Logistikbereichs [7; 44; 5; 33; 87; 75]. Der Markt reagiert jedoch nicht entsprechend den Erwartungen. Die tatsächliche Implementierung von Telematik ist bisher zögerlich. Somit wird der Nutzen nicht ausgeschöpft und positive Systemwirkungen bleiben aus [87].

Zwischen Global Playern und kleinen Unternehmen der Logistikbranche besteht eine Diskrepanz bezüglich des Ausstattungsgrades mit Telematik. Großunternehmen sind auf global vernetzte Informationsstrukturen mit zeitnahe Zugriff auf Planungsdaten für die gesamte logistische Leistung angewiesen, um international wettbewerbsfähig zu sein und ihre Marktposition zu erhalten beziehungsweise auszuweiten. Kleinere und mittelständische Unternehmen (KMU) nutzen Telematik vor allem, um in die Gesamtprozessstrukturen von *Global Playern* eingebunden werden zu können. Die Optimierung eigener Dienstleistungen mit Telematik unterstützt die horizontale Konkurrenzfähigkeit, steht aber nicht im Vordergrund des Einsatzes. Auf Grund der finanziellen und personellen Möglichkeiten testen Global Player die Nutzenpotenziale neuer Technologien in der Praxis, integrieren diese gegebenenfalls als Erstes in die eigenen Prozesse und geben damit gewissermaßen die Standards vor. Die KMU richten sich dann an den gegebenen Bedingungen aus [72].

Neben der Unternehmensgröße ist auch die Branche (Kundenkreis und Gutart für die Logistikdienstleistung) dafür entscheidend, welche Technologieanwendung in welcher Dimensionierung eingesetzt wird. Der Nutzen von Telematik ist nicht in allen Prozessen

gleich und somit sind es überwiegend branchenspezifische Lösungen, welche das Nutzenpotenzial jeweils steigern und damit auch die Akzeptanz der Unternehmen fördern [72].

Grundsätzlich erhöht Telematik den Logistikkostenanteil. In vielen Fällen wird dieser durch die Wirkungen von Telematik kompensiert und führt zu Gewinn. Es gibt jedoch auch Fälle, bei denen er nur indirekt kompensiert wird, etwa wenn KMU Telematik nur dazu einsetzen, um weiter für Global Player transportieren zu können oder wenn Global Player Telematik in ihre Prozesse integrieren, um qualitative Verbesserungen zu erreichen (bspw. erhöhte Transparenz, Kundenzufriedenheit, Geschwindigkeit, Kundenbindung, etc.) [72].

Die Wirkungen von Telematik führen auch nicht pauschal zu geringerem Güterverkehrswachstum oder weniger Verkehr. Gründe dafür sind, dass durch Effizienzsteigerungen neue und erweiterte Dienstleistungen möglich sind und diese auch unternehmerisch genutzt werden.

Bei den von Unternehmen und Verbänden der Logistikbranche besonders hoch eingestufteten Nutzenfaktoren des Telematik-Einsatzes und den verkehrlich positiv einzustufenden Wirkungen gibt es jedoch eine Schnittmenge [72]:

- Verbesserung der Kapazitätsauslastung der Fahrzeuge,
- Reduzierung der Transportmittel und -einheiten,
- Vermeidung von Leerfahrten,
- Reduzierung der Fahrzeugkilometer.

Die Wirkungen von Telematik auf Indikatoren wie beispielsweise die Auslastung von Fahrzeugen, Leerfahrten, CO₂-Emissionen, Fahrzeugkilometer etc. sind Gegenstand in einigen Forschungsprojekten. Die Tiefe, in der die Wirkungen von Telematik ermittelt und analysiert werden, ist in der Literatur sehr unterschiedlich und reicht von mikroskopischen Simulationen, Feldtests und Befragungen bis hin zu groben Abschätzungen von Wirkungspotenzialen. Übersichten zu untersuchten Telematikwirkungen geben beispielsweise die Arbeiten [109; 12; 83; 108; 116].

Tatsächlich ist die Untersuchung von Telematikwirkungen ein äußerst komplexes Thema. Es existieren sehr viele Telematikanwendungen mit unterschiedlichen Wirkungszielen, unterschiedlichen Prozessumgebungen, unterschiedlichen Anwendern etc. Zusätzlich gibt es auch unterschiedlichste technologische Umsetzungen für ähnliche Anwendungen. Auf die

Darstellung der Vielzahl von untersuchten Wirkungsaspekten soll deshalb hier verzichtet werden. Für die Telematiksysteme ACC und CACC werden die Wirkungen in den Kapiteln 2.4 und 2.6 fokussiert dargestellt.

2.2. Entwicklungstrend von Telematik

Das Telematik ein Zukunftsthema ist, welches das Verkehrssystem verändern wird, sollen folgende Ausführungen verdeutlichen.

Die Entwicklung, das Angebot und die Implementierung von Telematik konzentrierten sich in den letzten zwei Dekaden auf Stand-alone-Applikationen für Firmen, Fahrzeuge und Fracht. Telematik wird jedoch von der Wissenschaft, öffentlichen Einrichtungen und Industrie weiter entwickelt und gefördert. Daraus resultieren neue Technologien, neue Einsatzbereiche und die Erweiterung bestehender Konzepte.

In Zukunft wird, so zeichnet es sich in der Literatur der Logistikbranche ab, der Aufbau und Betrieb von Logistiknetzwerken weiter forciert. Neben dem bisher dominanten Einsatz von Telematik in der operativen Logistik soll auch die strategische Planung durch IuK-Anwendungen unterstützt werden [44; 72]. Als Schlüsseltechnologien dafür betrachtet man mobile Übertragungsgeräte, genaue Positionsdaten (GALILEO, GPS, GSM), das mobile Internet, den XML-Standard, erweiterte Routingsysteme, On-Board-Sensoren und Smart Cards (für das Speichern und Auslesen von Fahrer-, Fahrzeug- und Ladungsinformationen) [44]. Die Standardisierung und Interoperabilität von Nachrichten/Informationen sind notwendige Entwicklungs- und Forschungsgebiete, damit ein vereinfachter Zugang zu Technologien, deren Integration in Logistikprozesse, die Vernetzung von Systemen und somit auch Synergieeffekte möglich werden.

FREIGHTWISE erforscht beispielsweise die Implementierung einer europaweiten IuK-Infrastruktur, welche die Anforderungen der Logistik, des Verkehrsmanagements und der öffentlichen Verwaltung abdecken soll. Eine Vielzahl von weiteren EU-Projekten wie THEMIS, TRIM, CVIS, ADASE 2, AIDER, PROMOTE CHAUFFEUR II, CarTALK und INFOLOG forschen am Aufbau von günstigen Rahmenbedingungen für den Einsatz von Telematik in der Logistik und den Fahrzeugen [44]. Die Kommission der Europäischen Gemeinschaft fördert explizit mit ihrem aktuell aufgestellten Aktionsplan die Einführung von intelligenten Verkehrssystemen (IVS) in folgenden, von ihr herausgestellten Bereichen [69]:

2. Analyse des Untersuchungsgegenstandes Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC)

- optimale Nutzung von Straßen-, Verkehrs- und Reisedaten,
- Kontinuität von IVS-Diensten für das Verkehrs- und Gütermanagement in europäischen Verkehrskorridoren und Ballungsräumen,
- Sicherheit und Gefahrenabwehr im Straßenverkehr,
- Verbindung von Fahrzeug und Verkehrsinfrastruktur,
- Datensicherheit, Datenschutz und Haftungsfragen,
- europäische Zusammenarbeit und Koordinierung im Bereich intelligenter Verkehrssysteme.

Auf einer *elektronischen Infrastruktur* aufbauend sind Objekte (Frachteinheiten), die sich in ihrer Umgebung orientieren, selbst organisieren und über das Internet miteinander kommunizieren, die Zukunftsvision mit optimal allokierten Ressourcen: *Güter als autonome Agenten im Internet der Dinge* [101].

„(...) whereas our motorway infrastructure has been built by civil engineers, organizing earthworks, pouring concrete and laying bitumen, tomorrow's 'infrastructure' is the domain of electrical and telecommunication engineers, IT-specialists and data analysts.“ [82]

In dieses sich abzeichnende Zukunftsszenario, bei dem der Verkehr deutlich von Telematik geprägt sein wird, ordnen sich ACC-Systeme als eine Anwendung ein, die bereits heute im Güterverkehr eingesetzt wird. ACC ist nur eines von vielen Fahrerassistenzsystemen für Nutzfahrzeuge. In der Abbildung 2.2 sind die AVCS-Systeme für Nutzfahrzeuge, unterschieden nach der Längs- und Querbewegung sowie nach Information und Steuerung, dargestellt. CACC nimmt dabei eine besondere Position ein, weil das System automatisch Längs- und Querbewegungen des Fahrzeugs steuert. Die meisten Systeme sind schon heute auf dem Markt verfügbar [123; 22; 41]. Die Abbildung macht auch deutlich, dass die technologisch realisierbaren Möglichkeiten der Fahrerassistenz weit fortgeschritten sind.

ACC als Vorgängertechnologie vom Untersuchungsgegenstand CACC wird in den folgenden Kapiteln behandelt. Anschließend erfolgen vertiefende Ausführungen zum Untersuchungsgegenstand Cooperative Adaptive Cruise Control. Sowohl methodisch als auch vom Spektrum der Wirkungen sind sich ACC und CACC ähnlich. Daher werden beide Systeme analog behandelt, indem zuerst die Anwendungen und dann die bekannten Wirkungen beschrieben werden.

	Längsbewegung	Querbewegung
Information	Auffahr-Warn-Assistent	Lane Departure Warning Spurwechsel-Assistent Abbiege-Assistent
Steuerung	Notbremsassistent Antischlupfregelung Stop and Go-Assistent Adaptive Cruise Control	<div style="text-align: center;">Cooperative Adaptive Cruise Control</div> Antiblockiersystem Elektronisches Stabilitätsprogramm

Abbildung 2.2.: Aktive FAS in Nutzfahrzeugen nach Eingriffsbereich und -tiefe in Anlehnung an [123; 22; 41]

2.3. Beschreibung des Systems: Adaptive Cruise Control (ACC)

Das ACC-System, auch adaptiver Tempomat genannt, ist ein aktives Fahrzeugsicherheitssystem. Es regelt die Geschwindigkeit des Fahrzeugs so, dass ein Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug automatisiert eingehalten wird. Wunschabstand und Wunschgeschwindigkeit sind vom Fahrer einzustellende Parameter des adaptiven Tempomaten. In das System ist ein Auffahrwarner integriert. Dieser reagiert mit Warnsignalen bei stehenden Hindernissen oder bei einer Geschwindigkeitsänderung des vorausfahrenden Fahrzeugs, welche über die Bremsleistung des ACC-Systems hinausgeht. Durch ACC wird der Fahrer entlastet, die Brems- und Beschleunigungsvorgänge präziser und die Fahrt damit wirtschaftlicher und umweltfreundlicher. Studien besagen, dass Auffahrunfälle von Lkw um 70 Prozent und Personenschäden um bis zu 7 Prozent verringert werden konnten [22; 68; 19; 112].

Der Fahrer justiert beim ACC-System seine Wunschgeschwindigkeit und seinen Wunschabstand in einem vorgegebenen Bereich zu einem vorausfahrenden Fahrzeug. Der Wunschabstand ist damit nicht beliebig klein wählbar, sondern ist bei den Systemen mit leicht

positiven oder negativen Abweichungen, je nach Fahrstil, zum Mindestabstand von 50 m einstellbar. Die Wunschgeschwindigkeit wird wie beim statischen Tempomat frei gewählt und gehalten, bis ein vorausfahrendes Fahrzeug von den Sensoren erfasst wird. Die Sensoren arbeiten dabei spurgenaue. Das bedeutet, dass der Gegenverkehr oder Fahrzeuge auf einer benachbarten Fahrspur als solche vom System registriert und erst im Fall eines Spurwechsels berücksichtigt werden. Befindet sich das andere Fahrzeug auf der eigenen Spur und fährt langsamer, wird die eigene Geschwindigkeit angepasst oder die voreingestellte Geschwindigkeit nach einem vom Fahrer durchzuführenden Überholvorgang wieder gehalten. Wird in einer Kolonne gefahren, hält ACC den voreingestellten Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug konstant. Für die automatischen Beschleunigungs- und Bremsvorgänge zur Geschwindigkeitsregelung muss das System auf die Fahrzeugkomponenten Motorleistung, Motorbremse, Retarder-Bremse, Betriebsbremse und Getriebe zugreifen können, um seine Funktion zu erfüllen. Dadurch besteht eine erhöhte Anforderung an die Fahrzeugausstattung, beispielsweise ein Automatikgetriebe. Die Sensoren arbeiten bei einigen Systemen unabhängig von schlechten Witterungsbedingungen wie Nebel, Regen oder Dunkelheit. Schnee, Eis und verschmutzte Sensoren hingegen schränken bei allen auf dem Markt befindlichen Systemen den Einsatz ein. Etwaige Fehlfunktionen des Systems werden dem Fahrer durch akustische und visuelle Warnungen signalisiert. Für Stop & Go, niedrige Geschwindigkeiten, Landstraßen und Fahrten innerhalb geschlossener Ortschaften ist das zurzeit verfügbare ACC nicht geeignet [68; 19; 20; 112].

Für eine Verordnung des *Europäischen Parlaments und des Rates* wurden zur *Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich ihrer allgemeinen Sicherheit* zwei AVCS-Telematik-Systeme vorgeschlagen. Es handelt sich im Vorschlag um eine neu zu regelnde, verpflichtende Fahrzeugausstattung der Fahrzeugklassen N1, N2, N3 (Kraftfahrzeuge zur Güterbeförderung) und M1, M2, M3 (Kraftfahrzeuge zur Personenbeförderung) mit einem Notbremsassistenten sowie einem Spurbeobachtungssystem. Dies betrifft die Zulassung von neuen Fahrzeugtypen ab 2013 und die Zulassung von Neufahrzeugen ab 2015 [70]. Wird dem Vorschlag zugestimmt, ist eine wichtige Voraussetzung für eine beschleunigte Verbreitung von ACC bei Güterkraftfahrzeugen gegeben, denn grundlegende Sensoren und einige Einrichtungen des Zugriffs auf Fahrzeugkomponenten sind bei Notbremsystemen und ACC identisch. [115; 118]

Neben der staatlichen Aufgabe, den Verkehrsablauf sicherer zu gestalten, sind auch Versicherungen an der Marktdiffusion von AVCS-Telematik interessiert. Mit praktizierten finanziellen Anreizen wird die Verbreitung unterstützt [9]. Das könnte sich bereits vor 2013

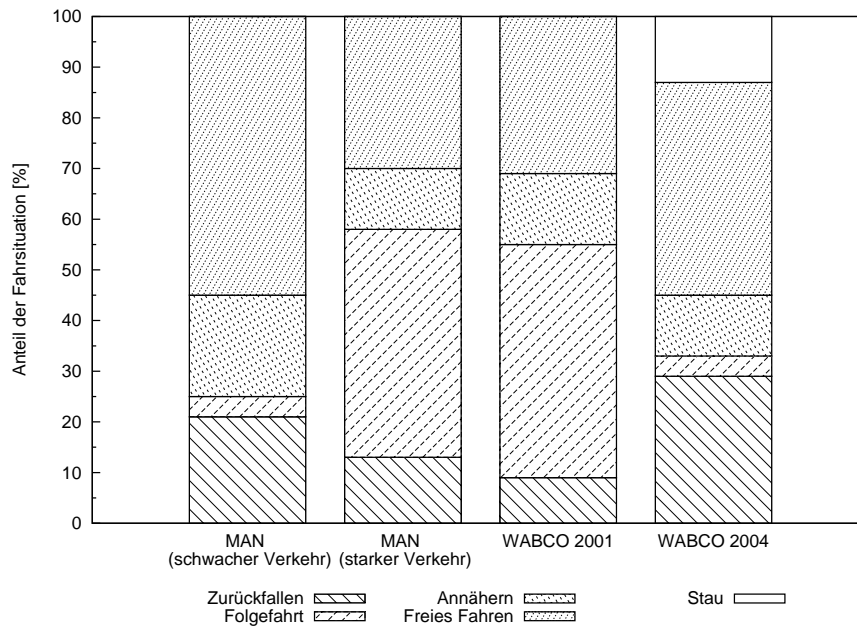


Abbildung 2.3.: Fahrsituationen auf Autobahnen für Lkw in Anlehnung an [68]

als Multiplikator für die Adoption der Systeme durch Speditionen auswirken. Beim Kauf von schweren Nutzfahrzeugen werden zurzeit etwa bei 5 Prozent Fahrerassistenzsysteme (ACC, Spurassistent, ESP) geordert [9]. Für Fahrerassistenzsysteme werden die Themen: Akzeptanz beim Fahrer, Entwicklung der Unfallhäufigkeit, Unfallschwere, Unfallursachen sowie Kosten und Nutzen im Projekt *Sicher. Für Dich. Für Mich.* untersucht [9].

Trotz dieser positiven technischen Effekte gibt es für die Adoption von ACC Rahmenbedingungen zu beachten. Das freie Fahren (ohne Interaktion mit anderen Fahrzeugen) hat im Fernverkehr von Lkw laut Szenarien von MAN und WABCO ein maximales Potenzial von 45 Prozent (siehe Abbildung 2.3). Dies wird damit begründet, dass viele Lkw wegen der tagsüber gestauten Verkehrsverhältnisse häufig nachts eingesetzt werden. [68]

Der Abgleich von Anforderungen und gegebenen Rahmenbedingungen sollte für ACC eine positive Kosten-Nutzen-Bilanz aufzeigen. Die Frage dazu ist: *Rechnet sich ACC im Fernverkehrs-Lkw?* Diese wird in einer Studie von der FKA und WABCO positiv beantwortet. Berücksichtigt wurde dabei ausschließlich die Kostenersparnis bei weniger Kraftstoffverbrauch durch das Fahren mit ACC. Die Kraftstoffkosten haben zwar einen hohen Anteil an den Betriebskosten der Lkw. Jedoch konnte die Frage abschließend und generell nicht beantwortet werden [68]. Letztendlich werden die Adoptionsraten von ACC

diese Frage beantworten. Im Jahr 2004 waren bereits etwa 4 Prozent der in Deutschland zugelassenen Lkw mit Telematiksystemen ausgestattet [30].

2.4. Wirkungen von ACC

Der größte Unterschied zwischen dem konventionellen Fahren und dem Fahren mit ACC-System besteht in der Reaktionszeit. Die Sensoren erkennen die Position und die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs schneller und präziser, als Menschen es tun können. Ein kompensatorischer Effekt ist allerdings die Antizipationsfähigkeit des Menschen an die gesamte Verkehrssituation. Dieser kann mehrere Fahrzeuge sehen, deren Verhalten als Kollektiv einschätzen und sein Fahrverhalten darauf einrichten. Im Gegensatz dazu kann der Sensor lediglich auf die Aktionen des vorausfahrenden Fahrzeugs reagieren [105]. Trotz eines gewissen Ausgleichspotenzials von Fähigkeiten zwischen dem nicht-technisch unterstützten und dem ACC-unterstützten Fahrer beeinflusst das ACC-Fahrerassistenzsystem das Fahrverhalten und somit auch makroskopische Verkehrskenngrößen wie beispielsweise die Reisezeit.

Die Wirkungen von ACC-Systemen wurden in vielen Forschungsprojekten untersucht. Zum einen gibt es Feldversuche und Studien, zum anderen hat man vielfach das durch ACC veränderte Fahrzeugfolgeverhalten mikroskopisch simuliert und so Aussagen zu Wirkungen erhalten. Aus diesen Forschungsarbeiten werden die Ergebnisse im Folgenden als Wissensstand dargestellt. Für den Einsatz von ACC in Lkw gibt es jedoch erst wenige Studien, denn die Erforschung von ACC-Wirkungen ist stark auf den Pkw-Verkehr ausgerichtet. Um das bekannte Wirkungsspektrum dennoch qualitativ vollständig darzustellen, werden auch Studien über den ACC-Einsatz bei Pkw zitiert.

Einflüsse auf die Sicherheit:

In einer Studie von GWEHENBERGER et al. wird das Potenzial des Sicherheitsgewinns durch ACC bei Lkw mittels einer Tiefenanalyse von 583 Unfallberichten abgeschätzt. Dabei sind etwa 22 Prozent der Unfälle als *ACC-relevant* eingestuft worden. Etwa 39 Prozent dieser Unfälle ereigneten sich auf Autobahnen, also der ACC-relevanten Infrastruktur. An etwa der Hälfte der Unfallsituationen, bei denen ACC hätte wirken können, waren Sattelzugmaschinen beteiligt. Insgesamt kommt die Studie zu dem Ergebnis, dass etwa 7 bis 8 Prozent aller Unfälle und $\frac{1}{3}$ der ACC-relevanten Unfälle durch dieses System verhindert werden können. Reagiert der

Fahrer innerhalb von 2 Sekunden nach dem ACC-System mit einer Vollbremsung, so wären 17 Prozent aller Unfälle vermeidbar. Würde das ACC-System um ein Notbremsssystem ergänzt werden, welches diese Vollbremsung automatisch durchführt, so wären bereits 21 Prozent aller Unfälle vermeidbar. Mit diesen Annahmen wären 70 Prozent aller Lkw-Auffahr-Unfälle auf Autobahnen vermeidbar. Zu diesen Schlussfolgerungen kamen die Autoren der Studie auf Basis der Fahreraussagen bezüglich des Unfallherganges [47].

Einflüsse auf das Abstandsverhalten:

FILZEK untersucht in einem Feldtest das Fahrzeugfolgeverhalten von Fahrern bei Pkw mit und ohne ACC. Auf einem 229 Kilometer langen Autobahnabschnitt sind 29 Fahrer mit einem Pkw in verschiedenen Verkehrssituationen die Strecke jeweils ohne und mit ACC-Ausstattung gefahren. Die *Folgefahrt* und die *Freie Fahrt* sind die weitaus dominanten Verkehrssituationen gewesen. Die Folgefahrt ist die eigentliche ACC-relevante Verkehrssituation. Ohne ACC fahren die Testpersonen sehr risikoreich, selbst unter Testbedingungen. In über 80 Prozent der Fahrzeit von Folgefahrten wurde der Sicherheitsabstand nicht eingehalten und bei 41 Prozent davon sogar der Ordnungswidrigkeits-Bereich unterschritten. Es wurde festgestellt, dass der Abstand mit zunehmender Verkehrsdichte geringer gewählt wird. Bei den Fahrten mit ACC-System wurden die eingestellten Zeitlücken häufig übersteuert und so geringere Abstände erzielt als vom System vorgesehen waren [37]. Die Akzeptanz des Systems im Verkehr und damit eine ausbleibende Übersteuerung führt zu größeren Zeitlücken zwischen den Fahrzeugen im Vergleich zur Fahrt ohne ACC.

Messungen zum Abstandsverhalten von Lkw auf Autobahnen und Bundesstraßen zeigen, dass die Unterschreitung des Mindestabstandes sich in einem Bereich bis zu maximal 32 Prozent bewegt [29]. Die extrem realisierten Sicherheitsabstände, wie sie im Feldtest von FILZEK auffielen, werden nicht erreicht. Das deutet auf eine höhere Akzeptanz und geringere Übersteuerungsquoten hin, da sich die wählbaren Einstellungen von ACC und realen Zeitlücken ohne ACC ähnlich sind. Unterscheiden sich diese beiden stark, so unterstellt FILZEK eine geringere Akzeptanz [37].

Einflüsse auf die durchschnittliche Geschwindigkeit und die maximale Verkehrsstärke:

Durch eine Metastudie verschiedener Untersuchungen kommen DRAGUTINOVIC et

al. zu dem Ergebnis, dass ein geringer Einfluss ($-0,1 \frac{Km}{h}$) auf die durchschnittliche Geschwindigkeit durch ACC im Pkw-Verkehr besteht [26].

In einem Feldtest auf einem schwedischen Highway (mehrere Fahrten zwischen Södertälje und Norrköping) bei jeweils geringer oder moderater Verkehrsdichte war eine Verbesserung der Reisezeit für den Test-Lkw im Durchschnitt (Hin- und Rückweg sowie bei verschiedenen Wunschgeschwindigkeitseinstellungen) von vernachlässigbaren 0,03 Prozent ermittelt worden. Die höchste Verbesserung der Reisezeit betrug 1,6 Prozent. Es gab auch leichte negative Effekte im Vergleich von Fahrten mit und ohne ACC. Diese traten bei niedrig eingestellten Wunschgeschwindigkeiten auf [53].

Andere Forschungsergebnisse berichten jedoch über deutlichere Einflüsse von ACC auf die durchschnittliche Geschwindigkeit beziehungsweise auf die Reisezeit. In [105] und [45] sind mehrere Studienergebnisse zusammengetragen worden. Beispielsweise ermittelten HOEDEMAEKER et al. in einer Untersuchung am Fahrsimulator auch bei geringer Verkehrsdichte höhere durchschnittliche Geschwindigkeiten. Es ergaben sich durch den Einsatz von ACC in Pkw Steigerungen der durchschnittlichen Geschwindigkeit zwischen 5 und 10 $\frac{km}{h}$ [56].

DAVIS simulierte den Verkehrsablauf an einer Auffahrt mit und ohne ACC und das Ergebnis war ebenfalls deutlich. Bei einem Ausstattungsgrad von 50 Prozent der Fahrzeuge (gemischte Verkehrszusammensetzung) wurde der Fahrzeugdurchsatz um 18 Prozent erhöht und die durchschnittliche Geschwindigkeit steigerte sich um das Dreifache (im Gegensatz zum vorher gestauten Verkehrszustand am Engpass) [21].

Die Ergebnisse aus der Dissertation von KESTING belegen ebenfalls einen deutlichen Einfluss des ACC-Einsatzes bei Lkw und Pkw auf den Verkehrsfluss an einem Engpass. Für die Untersuchung wurde jeweils ein mikroskopisches IDM (Intelligent Driver Model) und ein HDM (Human Driver Model) formuliert. Das HDM simuliert das manuelle Fahren inklusive Spurwechsel. Das IDM ist für die Modellierung der Wirkungen von ACC durch die implementierten Parameter geeignet. Es wurden verschiedene Szenarien simuliert, bei denen der ACC-Ausstattungsgrad der Fahrzeugflotte, der Lkw-Anteil sowie die Fahrstile variierten. Jedes Szenario wurde 1000-mal wiederholt, um die statistische Sicherheit bei der Ergebnisauswertung zu sichern. Die Verkehrssituation in der Messreihe war eine zweistreifige Autobahn mit einer

Einschränkung des Verkehrs auf eine Fahrspur als Engpass. Pkw und Lkw wurden zufällig ausgewählt und mit dem System ACC ausgestattet (ihnen wurde das entsprechende Fahrzeugfolgemodell zugewiesen). Die Ergebnisse der Untersuchung sind wie folgt [66]:

Die Wahrscheinlichkeit des Verkehrszusammenbruchs nimmt bei zunehmendem ACC-Ausstattungsgrad deutlich ab. Als maximal erreichbare Verkehrsstärke q_{max} konnte bei einem Ausstattungsgrad der Flotte von 20 Prozent eine Steigerung von 6 bis 8 Prozent und bei einem Ausstattungsgrad von 50 Prozent eine Steigerung um 16 bis 21 Prozent ermittelt werden. Der Zusammenhang zwischen dem Ausstattungsgrad der Flotte und der maximalen Verkehrsstärke ist dabei annähernd proportional.

Der Fahrstil, im Modell der eingestellte Sicherheitsabstand T , hat großen Einfluss auf q_{max} . Der Zusammenhang stellt sich erwartungsgemäß so dar, dass q_{max} sinkt, wenn T erhöht wird. Zu beachten ist, dass die Stabilität des Verkehrsflusses ebenfalls durch T beeinflusst wird. Für ein verringertes T erhöht sich die Diskrepanz zwischen der theoretisch maximalen und der erreichbar maximalen Verkehrsstärke. Das bedeutet, dass ein geringer Sicherheitsabstand die Stabilität des Verkehrsflusses abschwächt.

Die Beschleunigungswerte (eingestellte Maxima und Minima) von ACC haben keinen relevanten Einfluss auf q_{max} . Die Staufront baut sich mit erhöhtem ACC-Anteil in der Flotte schneller ab. Die Steigerung liegt bei 12 bis 16 Prozent unter der Annahme, dass der ACC-Ausstattungsgrad der Flotte 50 Prozent beträgt. Damit ist die stauverlassende Verkehrsstärke höher als diejenige die in den Stau einfahren würde. Mögliche Routenwahleffekte sind dabei nicht berücksichtigt. Der Zusammenhang zwischen ACC-Ausstattungsgrad und q^{out} ist nicht-linear, wie es bei q_{max} und Ausstattungsgrad ist. Nicht genauer untersucht, aber vermutet wurde, dass langsamer beschleunigende Lkw an der Staufront diesen Effekt hervorrufen. Der Fahrstil beeinflusst den Abbau der Staufront nur, wenn eine erhöhte Beschleunigung und ein verringerter Sicherheitsabstand im ACC-System eingestellt werden. Bereits geringe Ausstattungsgrade der Flotte haben einen signifikanten Einfluss auf die Reisezeit. Die Reisezeit sinkt mit zunehmendem ACC-Ausstattungsgrad bis zu den Reisezeiten auf der freien Kante t_0 . Das ist bereits bei einem ACC-Ausstattungsgrad von 35 Prozent und mehr der Fall. Der Fahrstil hat einen marginalen Einfluss auf die Reisezeit im Vergleich zum Ausstattungsgrad.

Der Blick auf den Einfluss von ACC auf die Geschwindigkeit und die Kapazität sollte nicht ohne gleichzeitige Betrachtung der Verkehrssituation geschehen. Erst bei

hoher Verkehrsdichte häufen sich Folgefahrten und damit der Einsatzbereich des Systems. Die Tendenz zur Verbesserung der durchschnittlichen Geschwindigkeit ist jedoch bereits bei geringen Verkehrsdichten gegeben. Für eine hohe Verkehrsnachfrage oder an einem Engpass ist der Effekt deutlich positiv.

Einflüsse auf den Kraftstoffverbrauch:

Das Software-Instrument PELOPS modelliert submikroskopisch die Fahrzeugdynamik und mikroskopisch den Verkehrsfluss. Durch so genannte Software-in-Loop-Simulationen (Sil) können Interdependenzen zwischen Fahrer, Fahrzeug und dem Umgebungsverkehr in das Modellierungsergebnis einfließen [38]. Mit PELOPS wurde der Kraftstoffverbrauch mit und ohne ACC-Regelung bei Folgefahrten ermittelt. Durch die erhöhte Kolonnenstabilität mit ACC ist der Kraftstoffverbrauch von 32,8 auf $29,9 \frac{\text{Liter}}{100\text{Km}}$, um etwa 9 Prozent, gesunken [124].

Der zuvor benannte Feldversuch in Schweden von HELLSTROEM et al. (siehe *Einflüsse auf die durchschnittliche Geschwindigkeit und Reisezeit*) ergab ein in der Tendenz ähnliches Ergebnis. Der Kraftstoffverbrauch eines ACC-geregelten Lkw konnte um etwa 3,5 Prozent gesenkt werden (von 36,33 auf $35,03 \frac{\text{Liter}}{100\text{Km}}$). Die maximal erreichte Kraftstoffersparnis war 6,2 Prozent [53]. Zu bemerken ist, dass diese Effekte bereits bei geringer Verkehrsstärke auftraten.

Die Simulation und der Feldtest zeigen ein ähnliches Bild zur Kraftstoffersparnis durch den ACC-Einsatz bei Lkw.

Einflüsse auf die Trajektorien von Fahrzeugen:

Beschleunigung und die Negation, das Bremsen, werden vom ACC-System übernommen, falls dies in der Verkehrssituation erforderlich ist. TAPANI hat in Simulationen deutliche Einflüsse zwischen den Trajektorien von Fahrzeugen mit und ohne ACC feststellen können. Diese sind aber nicht unabhängig von der Wunschgeschwindigkeit des Fahrers. Mit hohen Wunschgeschwindigkeiten müssen sie häufiger bremsen als mit gemäßigten. Die Reaktionszeiten verändern sich vom nicht-telematikunterstützten Fahrer (0,4 Sekunden) zum ACC-gestützten Fahren um annähernd 0,3 Sekunden ([105]).

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass das Fahrzeugfolgeverhalten durch ACC wesentlich beeinflusst wird.

Die Ausführungen zu den Wirkungen von ACC zeigen ein interessantes Bild von deutlichen Einflüssen auf verkehrliche Kenngrößen durch die Teilautomatisierung des Verkehrsablaufes.

Man kann bei der Vollautomatisierung des Verkehrsablaufes durch CACC eine Steigerung dieser Effekte erwarten. Nach der Beschreibung des Systems *CACC* im folgenden Kapitel werden die bekannten Wirkungen von CACC und auch vergleichende Studien zu den Wirkungen beider Systeme zitiert.

2.5. Beschreibung des Systems: Cooperative Adaptive Cruise Control

Cooperative Adaptive Cruise Control ist die Weiterentwicklung von ACC. Das Fahrerassistenzsystem übernimmt nicht nur die Längsführung (Beschleunigungs- und Verzögerungsaufgaben, wie beim Fahren mit ACC), sondern auch die Querverführung des Fahrzeugs. Zusätzlich tauscht CACC Informationen mit anderen Fahrzeugen aus. Die nötige technische Ausgestaltung des Fahrzeugs ist als Überblick in Abbildung 2.4 dargestellt. Dazu gehören beispielsweise ein automatisches Schaltgetriebe, eine elektronisch gesteuertes Bremssystem, Abstandssensorik und Kommunikationssysteme. Es bestehen deutlich höhere technische Anforderungen an das Fahrzeug als beim Betrieb ohne CACC, was zusätzliche Investitionen bedeutet. Mit diesen Funktionalitäten ausgestattete Fahrzeuge sind zu einem Fahrzeugverband koppelbar, wobei alle Fahrzeuge außer dem Führungsfahrzeug vollständig automatisch fahren. Das erste Fahrzeug fährt manuell gesteuert. Die Informationen jedes Fahrzeugs werden an alle gekoppelten Fahrzeuge übertragen. Das dadurch erreichte synchrone Fahren ermöglicht sehr geringe Abstände von 10 bis 15 Metern [42; 40; 1].

Zusätzliche bauliche oder verkehrstechnische Maßnahmen sind für Konvoi-Fahrten nicht notwendig, wobei sich nur vier- und mehrspurige Autobahnstrecken für den Einsatz eignen. Einschränkungen kann es bei Ein- und Ausfahrten, Tunneln und Brücken, Baustellen sowie bei hoher Verkehrsstärke und gleichzeitig mangelnder Überholmöglichkeit geben [60; 40]. In Nordamerika wird von Forschern die Untersuchung separater CACC-Spuren, die nur von ausgestatteten Fahrzeugen benutzt werden dürfen, fokussiert [1].

Im Projekt *Einsatzszenarien für Fahrerassistenzsysteme im Straßengüterverkehr und deren Bewertung (EFAS)* wurde die Realisierung von CACC untersucht. Das Einsatzfeld wären Autobahnen, bei denen Fahrzeugverbände von zwei bis sieben Fahrzeugen möglich sind. Das Bilden von Konvois ist räumlich und zeitlich frei wählbar und kann in drei grundsätzlichen Varianten organisiert werden [54]:

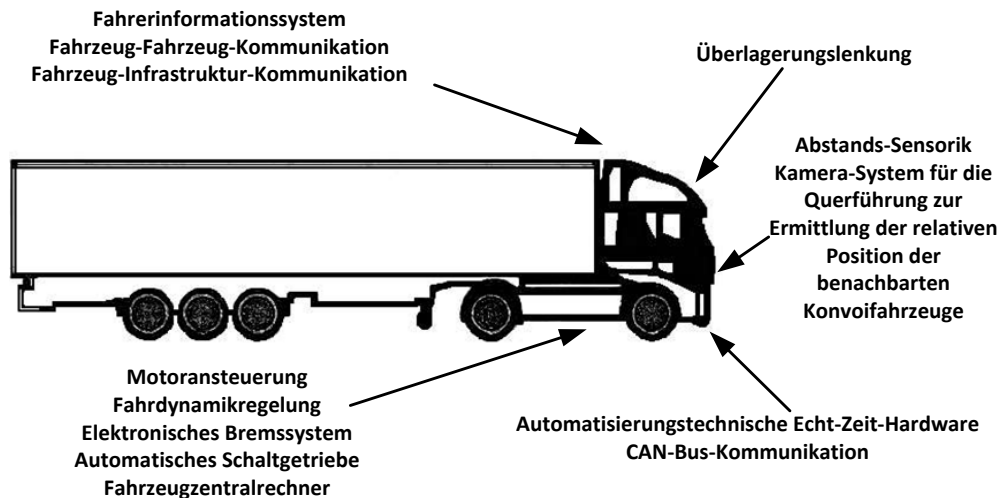


Abbildung 2.4.: Nötige technische Systeme am Fahrzeug für CACC in Anlehnung an [55]

- fahrerorganisierte Konvois (Konvoibildung durch Fahrer auf der Strecke ohne vorherigen Fahrplan),
- zentralorganisierte Konvois (Konvoibildung durch Fahrer auf der Strecke mit vorherigem Fahrplan),
- Konvois auf Sonderspuren (Ausgrenzung von nicht ausgestatteten Fahrzeugen auf diesen Fahrspuren).

Die realistischste Variante ist den Ergebnissen von EFAS zur Folge der *fahrerorganisierte Konvoi* auf sechsspürigen Autobahnen, da er das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis ausweist (effektive Fahrzeuglängen, keine Infrastrukturkosten, geringe Beeinflussung anderer Verkehrsteilnehmer) [54].

Der Prozess der Konvoibildung, der Konvoifahrt sowie der Konvoiauflösung (siehe Abbildung 2.5) wird im Folgenden so beschrieben, wie er im Projekt EFAS als umsetzbar erarbeitet wurde [95; 55].

Konvoibildung:

Zur Bildung eines Verbandes werden in einer Konvoiorganisationsphase automatisch potenzielle Konvoi-Teilnehmer gesucht und dabei Informationen zu Fahrziel, Fahrstrecke, aktuellem Standort und Leistungsgewicht (Quotient aus Motorleistung und Gewicht des Fahrzeugs unter Berücksichtigung der Zuladung) gesendet und

abgeglichen. Diese Informationen sind vom Fahrer einzugeben. Der Suchradius des Organisationsassistenten ist dabei maximal 20 Kilometer.

Der Konvoi kann nach derzeitigem Forschungsstand unter den Voraussetzungen gebildet werden, dass die gemeinsame Fahrstrecke mindestens 60 km beträgt, die Leistungsgewichte maximal +/- 10 Prozent voneinander abweichen und die maximale Anzahl von Fahrzeugen noch nicht überschritten ist [95].

Denkbar ist bei der Konvoibildung auch, dass mehrere optimierte Konvois aus den potenziellen Teilnehmern gebildet werden. Die Fahrer koppeln die Fahrzeuge an einem Treffpunkt, z. B. einem Parkplatz, elektronisch aneinander. Eine digitale Dokumentation von geleisteter Führungs- und Folgearbeit entscheidet darüber, welches Fahrzeug die Führungsaufgabe übernimmt. Das ist jenes mit der wenigsten Führungsarbeit, da der Ressourceneinsatz (Arbeit und Energie) bei einer Führungsfahrt höher ist als bei einer Folgefahrt. Eine elektronische Kopplung bedeutet, dass ein elektronischer Assistent eingeschaltet wird, der mit anderen Fahrzeugen kommuniziert, die Betriebsführung des Fahrzeugs übernimmt, die Daten verwaltet und die Disposition durchführt (zum Beispiel das Erstellen eines Konvoifahrplans).

Konvoifahrt:

Das Führungsfahrzeug übernimmt die Navigation des Konvois, führt die Manöver durch (Bremsen, Beschleunigen, Kurvenfahrt) und überträgt die Informationen in Echtzeit an die Konvoiteilnehmer. Weiterhin detektiert das Führungsfahrzeug Hindernisse im Verkehrsfluss sowie in der Infrastruktur, die zur Konvoiauflösung führen können und überwacht die Konvoiregeln und -aktivitäten. Längs- und Querverführung werden während der Fahrt von den Folgefahrzeugen automatisch ausgeführt. Die Aufgaben der Fahrer sind die Überwachung der Bordsysteme, Entscheidungen über den Ausschluss des Fahrzeugs aus dem Konvoi und die Durchführung besonderer Manöver. FRIEDRICHS et al. sprechen auch von zusätzlich möglichen Nebentätigkeiten, die der Fahrer bei der automatischen Folgefahrt im Konvoi durchführen könnte [41].

Konvoiauflösung:

Die Auflösung des Konvois erfolgt, sobald das Fahrziel des Fahrzeugverbandes erreicht wurde, ein Teilnehmer vorzeitig entkoppeln möchte oder besondere infrastrukturelle Bedingungen dies erzwingen. Infrastrukturseitig führen Anschlussstellen oder Knotenpunkte des Typs E1 (einstreifige Einfahrten an zweistreifigen Richtungsfahrbahnen),

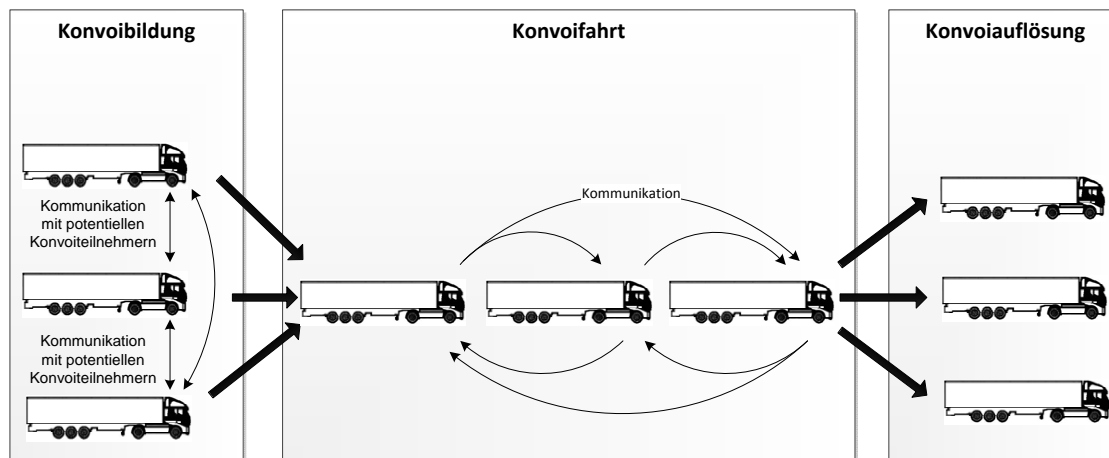


Abbildung 2.5.: Skizze des CACC-Einsatzes in einem Konvoi in Anlehnung an [41]

Baustellen, Brücken mit für den Auflösungszwang definierter Tragfähigkeit sowie Tunnel mit Längen über 400 Meter zur Auflösung.

Derzeit befindet sich CACC in der Testphase [25; 113]. VOLVO gibt in einer Pressemitteilung im Rahmen des EU-Projektes SARTRE bekannt, dass automatisiert fahrende Pkw in 10 Jahren Realität sein könnten [113]. Konkretere Abschätzungen unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen sind derzeit nicht verfügbar.

Fahrzeug-Zu-Fahrzeug-Kommunikation erfährt international viel Forschungsaktivität. Es wird geschätzt, dass die notwendigen Technologien bereits kurzfristig Preise erreichen werden, die einen Massenmarkt ermöglichen [39].

Die Stärken und Schwächen von CACC sind ebenfalls untersucht worden (für den Einsatz bei Pkw und Lkw) und werden wie folgt benannt [111]:

Stärken von CACC:

- verbesserte Stabilität des Verkehrsflusses,
- keine infrastrukturellen Maßnahmen für den Betrieb des Systems notwendig,
- Kommunikation von Fahrzeugen erweitert die Möglichkeiten von fahrzeugeigenen Sensoren,
- Informationen über das vorausfahrende Fahrzeug sind umfangreicher und präziser durch automatische Erfassung,

- durch Kommunikation bessere (harmonischere) Regelstrategien des Fahrerassistenzsystems möglich,
- weitere Systeme auf die Kommunikationsstruktur aufsetzbar,
- positive Effekte sind eine kürzere Reisezeit, höhere Kapazität der Strecke und Sicherheitsgewinne.

Schwächen von CACC:

- Nutzen erst bei hoher Diffusion der Technologie,
- Fahrer könnten die Leistungsfähigkeit der Systeme überbewerten und die Aufmerksamkeit senken,
- verschiedene verfügbare FAS-Systeme wie ACC, CACC, ESP etc. sind vom Standard-Nutzer immer schwerer zu überblicken,
- CACC wird eher für Neufahrzeuge geordert als in älteren Beständen nachgerüstet (Wirkung auf Diffusionsrate und -grad),
- im Pkw-Verkehr denkbar, dass die Systeme eher von vorsichtigen Fahrern als von aggressiveren (gefährdeteren) gekauft werden,
- System sollte idealerweise ohne Einschränkung, d. h. unabhängig von Witterungsbedingungen etc., funktionieren (24/7 Connectivity),
- illegale Computer-Angriffe (Hacks, Viren etc.) könnten ein kritisches Thema werden.

Es gibt deutliche Stärken, aber auch nicht zu unterschätzende Risiken, welche auf die Marktdiffusion von CACC wirken. Die Akteure dürfen bei der Bewertung der Stärken und Schwächen nicht vernachlässigt werden. Der öffentliche Sektor beispielsweise hat ein großes Interesse daran, Maßnahmen zu fördern, welche Sicherheit und Kapazität von Strecken erhöhen und nicht baulich sind (siehe dazu die geförderten Projekte der EU, USA und einzelner Staaten in Kapitel 2.1). Die Automobilindustrie kann der Kundschaft Innovationen anbieten und an den Systemen verdienen. Die Erforschung, Produktion und der Betrieb derartiger Fahrerassistenzsysteme ist eine große Branche. Eine Analyse dazu, wie die Fahrer derartige Systeme bewerten, ist noch nicht abschließend möglich, da sich CACC noch in der Forschungsphase befindet. Im Projekt KONVOI wurde dieses Thema bearbeitet, die Ergebnisse sind jedoch noch nicht veröffentlicht. Neben einer Euphorie gegenüber der neuen technischen Realität sind auch anfängliche Akzeptanzschwierigkeiten bezüglich des automatischen Fahrens mit sehr geringem Abstand zu erwarten. Die Zahlungsbereitschaft

für CACC muss neben der Akzeptanz ebenfalls gegeben sein [111; 123].

Über Erfolg oder Scheitern der Technologie entscheiden der Mensch (als Fahrer, Spediteur, als nicht-ausgestatteter Verkehrsteilnehmer, Entscheider etc.), die Organisationen (Betriebe, Wirtschaftlichkeit, volkswirtschaftliche Kosten und Nutzen etc.), die Technikentwicklung (Informations-, Fahrzeug-, Automatisierungs- und Regelungstechnik, Sicherheit etc.) sowie die Umwelt (Genehmigungsverfahren, bestehende Gesetze etc.) [54; 25].

Im folgenden Kapitel werden die bekannten Wirkungen von CACC dargestellt.

2.6. Wirkungen von CACC

Im Projekt KONVOI wurde das CACC-System erstmals bei Lkw mit realem Umgebungsverkehr getestet. Eine wissenschaftlich auswertbare Wirkungsanalyse konnte im Projekt noch nicht erreicht werden. Zurzeit gibt es zu den Wirkungen von CACC nur wenige Untersuchungen und diese beschränken sich auf Feldtests auf Versuchsstrecken ohne andere Verkehrsteilnehmer, Simulationen und qualitative Abschätzungen. Die Ergebnisse werden im Folgenden dargestellt.

Einflüsse auf die Sicherheit:

In einer Studie aus dem Jahr 1993 wurden mit Simulationen verschiedene Unfallsituationen zwischen dem manuellen und dem automatischen Fahren auf einer zweispurigen Straße untersucht und verglichen. Das zu erwartende Ergebnis wurde bestätigt. Es traten weniger Unfälle beim automatisierten Fahren auf. Eine Quantifizierung fand nicht statt [61].

Für eine Kosten-Nutzen-Analyse wurden im Rahmen des Projektes *CHAUFFEUR II* die Wirkungen auf die Sicherheit eines so genannten *Chauffeur Assistenten (CA)* abgeschätzt. Der CA ist ein erweitertes ACC-System, bei dem ebenso wie bei ACC die Geschwindigkeit und der Abstand vom System automatisiert gehalten werden, zusätzlich aber ein Spurführungssystem die Querbewegung des Fahrzeugs anhand der Fahrbahnmarkierung übernimmt. Ein mit dem CA ausgestattetes Fahrzeug kann einem beliebigen Fahrzeug (Pkw oder Lkw) im Abstand von 25 Metern folgen. Es handelt sich bei diesem System deshalb nicht um CACC, wie es in dieser Arbeit betrachtet wird (mehrere Fahrzeuge im 10-Meter-Abstand aneinander gekoppelt),

Szenario	Personenschaden	Sachschaden	Total
10 % CA	5.7 %	5.8 %	5.7 %
20 % CA	11.5 %	11.6 %	11.5 %
40 % CA	23.0 %	23.1 %	23.0 %

Tabelle 2.1.: Vermeidungspotenzial von Unfällen durch CA-Einsatz in Anlehnung an [7]

sondern um eine technische Stufe zwischen den Systemen ACC und CACC. Sicherheitseffekte vom System CA sind auf Basis von Unfalldaten des Statistischen Bundesamtes, ergänzt um Daten zu den Unfallgegnern und zum Abstandsverhalten von Fahrzeugen, ermittelt worden und sind als maximale Vermeidungspotenziale zu verstehen. Für die Bewertung der Effekte auf die Sicherheit wurden drei Szenarien gebildet mit unterschiedlichen Ausstattungsgraden (10, 20 und 40 Prozent) der Lkw-Flotte (Lkw mit zulässigem Gesamtgewicht größer 16 Tonnen und Sattelzugmaschinen). Die Anzahl der Unfälle mit Lkw kann bei einem Ausstattungsgrad der Flotte von 40 Prozent um insgesamt 23 Prozent reduziert werden. Das angegebene Vermeidungspotenzial von Unfällen ist proportional zum Ausstattungsgrad (siehe Tabelle 2.1) [7].

Einflüsse auf den Kraftstoffverbrauch:

Im aktuellen Projekt KONVOI wird durch den CACC-Einsatz bei Lkw eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs um 10 Prozent erwartet. Diese Wirkung entsteht durch Windschatteneffekte [40]. In früheren Publikationen zum Projekt wurden sogar 17 Prozent Kraftstoffersparnis geschätzt [6]. Die Projektergebnisse selbst sind noch nicht publiziert.

Im Vorgängerprojekt von KONVOI, namens Chauffeur II, wurde für den Einsatz von CA (siehe *Einflüsse auf die Sicherheit*) eine vorsichtig geschätzte Reduktion des Kraftstoffverbrauchs von 5 Prozent angegeben [7].

Bei Simulationen mit PELOPS im Rahmen des Projektes EFAS wurden Einsparungen von 3 bis 10 Prozent für das erste Folgefahrzeug ermittelt. Das niedrigste Ergebnis von 3 Prozent entstand bei einer dynamischen Regelung des Sollabstandes (10 bis 15 Meter) und einem voll beladenen Zustand des Lkw. Ist der Lkw dabei leer, wurden etwa 8,5 Prozent weniger Kraftstoff verbraucht. Für eine konstante Regelstrategie mit einem Sollabstand von 10 Metern ist eine Ersparnis von 10 Prozent

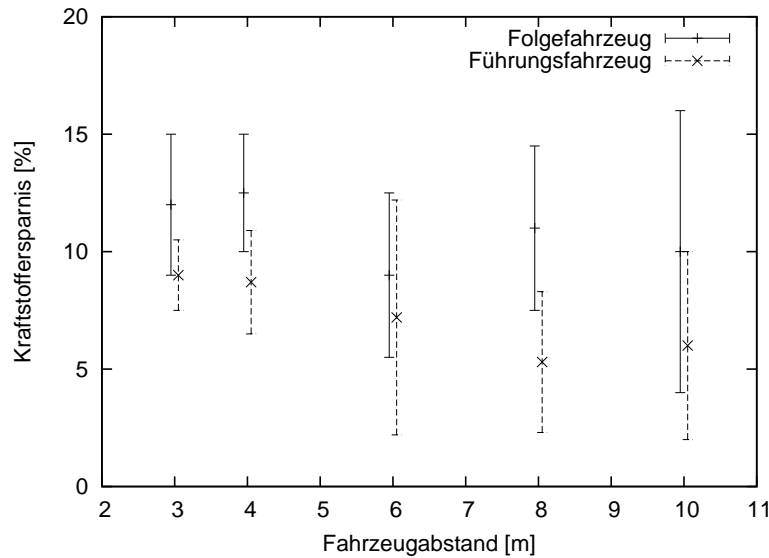


Abbildung 2.6.: Kraftstoffersparnis bei Lkw-Tandemfahrten gegenüber Einzelfahrten
in Anlehnung an [13]

berechnet worden. Der Belastungszustand des Lkw hatte dabei keinen Einfluss auf das Ergebnis [54].

In einem umfangreichen Feldtest mit zwei Fahrzeugen bei unterschiedlichen Windsituationen, Außentemperaturen und Abständen wurde der Kraftstoffverbrauch auf einer Versuchsstrecke gemessen. Die Ergebnisse für unterschiedliche Abstände sind differenziert nach Führungs- und Folgefahrzeug in Abbildung 2.6 dargestellt. Die Unterschiede zwischen dem Führungs- und dem Folgefahrzeug sind bei größeren Abständen (8 und 10 Metern) erwartungsgemäß deutlicher, aber auch die Einsparungen beim Führungsfahrzeug sind immer noch markant [13].

Im Rahmen des Projektes PATH wurde der Kraftstoffverbrauch von zwei Lkw auf einer Versuchsstrecke mit verschiedenen Abständen gemessen. Bei Abständen zwischen 3 und 10 Metern waren die gemessenen Kraftstoffverbräuche für das führende Fahrzeug zwischen 5 und 10 Prozent und für das folgende im Bereich von 10 bis 12 Prozent geringer als bei konventionellem Abstand. Für den Abstand von 10 Metern ist eine Ersparnis von 6 Prozent für das führende und 10 Prozent für das folgende Fahrzeug ermittelt worden [17].

Im aktuellen Projekt SARTRE schätzen Experten die Kraftstoffersparnis durch

CACC-Einsatz im Pkw-Verkehr auf 20 Prozent. Der Feldversuch wird 2012 enden und die Validierung der Angabe mit Abschluss des Projektes möglich sein [113].

GEHRING weist in seiner Dissertation eine Kraftstoffersparnis von 13 Prozent aus, welche er mit einem Versuchsfahrzeug ermittelt hat. Eine genauere Angabe zum Versuchsaufbau gibt es leider nicht [42].

Die Angaben zum Einsparungspotenzial von Kraftstoff durch CACC sind nicht eindeutig, können aber mit etwa 10 Prozent angesetzt werden. Insbesondere decken sich bei diesem Wert weitestgehend die Feldtestergebnisse aus PATH und von GEHRING mit den Simulationsergebnissen aus PELOPS und KONVOI.

Zu bemerken ist der unterschiedliche Verbrauch von Führungsfahrzeug und Folgefahrzeug. Nimmt man jedoch an, dass die Anzahl von Führungsfahrten und Folgefahrten unter den ausgestatteten Lkw von einem Organisationsassistenten gleichverteilt werden (siehe CA-Assistent), könnte dieser Fakt vernachlässigt werden.

Einflüsse auf den Verkehrsfluss und die Kapazität:

Im Projekt CHAUFFEUR II wurden die Wirkungen des Chauffeur-Assistenten (siehe *Einflüsse auf die Sicherheit*) in Simulationen ermittelt. Die Simulation wurde mit den Modellen VISSIM (Modellierung des Verkehrsflusses) und FARSI (Verhalten der ausgestatteten Lkw) durchgeführt. Der Streckenabschnitt war 2,5 Kilometer lang und in Szenarien mit jeweils zwei beziehungsweise drei Richtungsfahrbahnen waren die Gradienten 0, 2 und 4 Prozent implementiert. Der Lkw Anteil in der Verkehrsnachfrage betrug 20 Prozent. Von diesen Lkw wurden jeweils 10, 20 und 40 Prozent mit dem System CA ausgestattet. In Voruntersuchungen zum Projekt wurde bereits ermittelt, dass der CA bei geringer Verkehrsstärke einen vernachlässigbar kleinen, jedoch nicht negativen Effekt auf die Kapazität hat. Deshalb wurde die Verkehrsnachfrage in Höhe der maximalen Verkehrsstärke der Strecke umgelegt.

Im Szenario 40 Prozent ausgestatteter Lkw, dreispurige Strecke und 0 Prozent Steigung wurde die höchste Kapazitätssteigerung von 3,65 Prozent ermittelt. Die Ergebnisse der Szenarien sind in Tabelle 2.2 aufgeführt. Insgesamt wurde resümiert, dass die Kapazitätssteigerungen auf dreispurigen Strecken, auch unter Berücksichtigung von Ergebnissen aus Vorstudien, deutlicher sind als auf Zweispurigen [7].

	Strecken- gradient	10 % CA	20 % CA	40 % CA
2 Fahrspuren	0 %	100.63 %	101.33 %	102.67 %
	2 %	100.45 %	101.96 %	102.24 %
	4 %	100.70 %	101.32 %	102.48 %
3 Fahrspuren	0 %	100.37 %	101.53 %	103.65 %
	2 %	100.87 %	101.73 %	103.40 %
	4 %	100.29 %	101.38 %	102.84 %

Tabelle 2.2.: Durchschnittliche Steigerungen der Kapazität durch CA-Einsatz in Anlehnung an [7]

Beim Projekt EFAS wurden zur Abschätzung von CACC-Wirkungen drei Szenarien gerechnet. Die einzelnen Szenarien unterschieden sich in der Organisationsform (fahrer- oder zentralorganisiert sowie separate CACC-Spur) als auch im Lkw-Anteil (10 und 30 Prozent), dem CACC-Ausstattungsgrad (10, 20, 40 und 100 Prozent) und der Fahrzeugdichte (75 und 90 Prozent) im Streckenabschnitt. Für das Szenario mit dem fahrerorganisierten Konvoi wurden zwei Fahrspuren implementiert und für den zentralorganisierten Konvoi drei. Diese Untersuchung unterscheidet sich von anderen Simulationen durch die Modellierung des Such-, Annäherungs- und Ankopplungsprozesses. So sind die Fahrzeuge auf einer Strecke nicht per se gekoppelt, sondern werden durch Überholmanöver zueinander geführt.¹ Als Ergebnis der Simulation zeigten sich für Ausstattungsgrade von 10 bis 40 Prozent geringe oder keine signifikanten Effekte auf die Reisegeschwindigkeit oder die Kapazität. Der Grund ist, dass hier angenommen wurde, dass eine schnelle Organisation und Bildung großer Konvoiverbände nicht vorausgesetzt werden kann, selbst nicht bei einem 100 Prozent-Szenario. Die Wirkungen von CACC sind leider nur exemplarisch beschrieben, weisen aber folgende sehr interessante Ergebnisse auf.

Im Szenario mit zwei Fahrspuren wurden die Effekte von CACC während der Konvoibildung überkompensiert. Die Überholvorgänge der Lkw zur Konvoibildung haben den Verkehr stärker beeinträchtigt als die geregelten Lkw positiv auf Geschwindigkeit und Kapazität wirkten.

Für das Szenario mit drei Fahrspuren wurde ein anderes Ergebnis ermittelt. Die dritte Fahrspur verringert die Beeinträchtigung des Umgebungsverkehrs deutlich. Konvois von bis zu fünf Lkw konnten sich bilden und die Anzahl der im Konvoi

¹ Das erweitert das als wahrscheinlich ermittelte Einsatzszenario, dass sich die Fahrer selbstorganisiert an einem Treffpunkt koppeln (siehe Kapitel 2.5).

beteiligten Fahrzeuge konnte durch den zur Verfügung stehenden Verkehrsraum gesteigert werden. Deshalb waren Reisegeschwindigkeitssteigerungen von 14 Prozent und ein stabilisierter Verkehrsfluss die Folge.

Das dritte Szenario enthielt neben drei Fahrspuren für nicht ausgestattete Fahrzeuge eine Zusätzliche für CACC-ausgestatteten Lkw. Durch diese zusätzliche Fahrspur konnte die gesamte durchschnittliche Reisegeschwindigkeit um 20 Prozent gesteigert werden [54].

Um Effekte von CACC auf den Verkehrsfluss zu untersuchen, wurden von VIS-SER mikroskopische Simulationen mit der Software MIXIC durchgeführt. Simuliert wurde ein 4 Kilometer langer Highway-Abschnitt mit vier Richtungsfahrbahnen, bei dem nach drei Kilometern die Strecke auf drei Fahrbahnen reduziert wurde. Die Verkehrszusammensetzung wurde nach Daten der niederländischen A4-Autobahn implementiert, mit 94 Prozent Pkw, 4 Prozent leichte Nutzfahrzeuge und 2 Prozent Lkw. Das bedeutet, dass die Simulationsergebnisse vielmehr den Einsatz von CACC bei Pkw als bei Lkw repräsentieren. Der Zeitabstand von mit CACC ausgestatteten Fahrzeugen (Lkw, Nutzfahrzeuge und Pkw) betrug 0,5 Sekunden; bei konventionellen Fahrzeugen 1,4 Sekunden. Es wurden sechs Szenarien für den gemischten Verkehr von 0 bis 100 Prozent CACC-ausgestatteten Fahrzeugen und vier Szenarien von 20 bis 80 Prozent CACC-ausgestatteten Fahrzeugen auf einer separaten CACC-Spur berechnet. Als CACC-Spur wurde der vierte Richtungsfahrestreifen implementiert. Die Ausstattungsgrade wurden zwischen den Szenarien um jeweils 20 Prozent erhöht. Schockwellen wurden in der Untersuchung als Indikator für die Stabilität des Verkehrsflusses genutzt. Als Ergebnis der Simulationen ohne separate CACC-Spur wurde die Anzahl der Schockwellen zwischen dem Referenzszenario und dem Szenario von 100 Prozent ausgestatteten Fahrzeugen vor dem Engpass um etwa 90 Prozent reduziert. Bei 20 Prozent ausgestatteten Fahrzeugen betrug die Verringerung der Schockwellen bereits 30 Prozent. Nach dem Engpass ist die Anzahl der Schockwellen ebenfalls reduziert, wenn auch nicht in dem Maße wie vor dem Engpass. Die Reduktion der Schockwellenanzahl zeigt im Szenario mit separater CACC-Spur ein ähnliches Muster wie bei dem zuvor beschriebenen.

Die durchschnittliche Geschwindigkeit konnte vor dem Engpass zwischen den Szenarien 0 Prozent und 100 Prozent CACC-ausgestatteten Fahrzeugen um etwa 10 Prozent gesteigert werden. Am Querschnitt nach dem Engpass wurde keine Steigerung gemessen. Ein weiteres interessantes Ergebnis der Simulation ist, dass die

2. Analyse des Untersuchungsgegenstandes Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC)

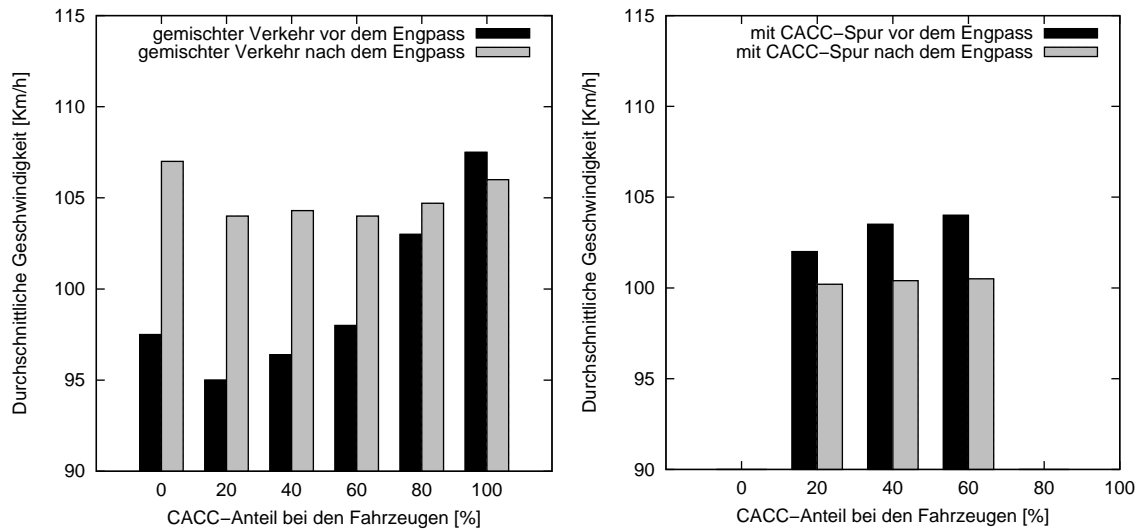


Abbildung 2.7.: Durchschnittliche Geschwindigkeiten bei verschiedenen Szenarien
in Anlehnung an [1]

durchschnittliche Geschwindigkeit bei niedrigen Ausstattungsgraden gesunken ist. Die Simulationen mit separater CACC-Spur weisen, im Gegensatz zu den Szenarien mit gemischtem Verkehr, vor dem Engpass höhere und nach dem Engpass niedrigere Geschwindigkeiten auf (siehe Abbildung 2.7).

Der Fahrzeugdurchsatz vor dem Engpass wird nur geringfügig positiv beeinflusst. Verbesserungen sind zwischen den Diffusionsgraden 60 und 80 Prozent signifikant. Simulationen mit separater CACC-Spur zeigen wenig Einfluss auf den Durchsatz von Fahrzeugen und dabei noch geringere Verbesserungen als bei den Simulationen ohne CACC-Spur.

Die Simulationen des CACC-Einsatzes mit den Konzepten mit und ohne eigene CACC-Spur zeigen ein differenziertes Ergebnis zwischen den Einsatzszenarien und den Diffusionsgraden. Bei hohem CACC-Ausstattungsgrad verbessern sich die Stabilität des Verkehrsflusses und die durchschnittliche Geschwindigkeit. Diese Verbesserungen hängen aber auch davon ab, ob die Verkehrsdichte hoch oder niedrig ist, da bei viel Verkehr mehr Interaktion zwischen den Fahrzeugen besteht, welche dann von CACC verändert wird. Eine separate CACC-Spur in Kombination mit geringen Ausstattungsgraden wirkt negativ auf den Verkehrsfluss. Bei einem hohen Diffusionsgrad führt die separate CACC-Spur zu Verbesserungen. Die Kapazität wird

bei einer Spursperrung nur geringfügig verbessert [111; 1].

Zu betonen ist, dass die Verkehrsstärke im Versuch nicht bis zur Kapazitätsgrenze variiert wurde, was Auswirkungen auf die Ergebnisse hat. Die Anzahl der Schockwellen im Verkehrsfluss sinken durch den CACC-Einsatz. Diese wurde an drei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen innerhalb von maximal 50 Metern und einer Verzögerung von $5 \frac{m}{s^2}$ oder mehr gemessen. Eine deutlich verringerte Anzahl von Schockwellen sollte die durchschnittliche Geschwindigkeit sowie die Kapazität erhöhen [121]. Tatsächlich wurde im Versuch Gegenläufiges festgestellt. Die durchschnittliche Geschwindigkeit sinkt teilweise und die Kapazität erhöht sich nur wenig. Zu begründen sind diese Effekte damit, dass die Verkehrsstärke nicht sehr hoch war und somit die beeinflussenden Wirkungen einer Schockwelle bei drei Fahrzeugen nicht auf weitere gewirkt hat.

Sinkende Geschwindigkeiten für bestimmte Diffusionsgrade von CACC zeigte auch schon eine Arbeit aus dem Jahr 1997, welche automatisches Fahren untersucht hat. Mit einem mathematischen Modell wurde berechnet, dass sich die Verkehrsstärke auf einer Strecke durch CACC erhöht, bei niedrigen Diffusionsgraden von 5 bis 10 Prozent diese jedoch leicht abgesunken ist. Jedoch auch bei diesem Versuch wurde die Verkehrsstärke nicht variiert [121].

Bezüglich der Reisezeit und der Kapazität gibt es sehr unterschiedliche Ergebnisse, von negativen, über vernachlässigbare bis zu positiven Effekten. Es liegen zurzeit kaum vergleichbare Ergebnisse vor, da variierende Verkehrsdichten, Ausstattungsgrade, Modellqualitäten und die Simulation von Engpässen sehr unterschiedliche Voraussetzungen bei den Untersuchungen darstellen. Will man diese zusammenfügen, müssen die Einzelergebnisse mit ihrem Szenariohintergrund bewertet werden. Ein Gesamtbild zu Reisezeit und Kapazitätseffekten lässt sich aus den vorhandenen Daten wie folgt zusammenfassen:

Für den gemischten Verkehr (CACC und nicht ausgestattete Fahrzeuge) scheinen auf zweispurigen Autobahnen die Effekte vernachlässigbar bis leicht negativ zu sein. Die Störung des Umgebungsverkehrs und die Möglichkeiten zur Konvoibildung beeinträchtigen die Wirkungsentfaltung von CACC. Auf dreispurigen Autobahnen ist das nicht mehr gegeben und Steigerungen der durchschnittlichen Reisezeit von 14 Prozent sind möglich. VISSER ermittelt auf einer vierspurigen Autobahn eine 10 Prozent höhere Durchschnittsgeschwindigkeit. Es ist weiterhin festzuhalten, dass bei niedrigem Verkehrsaufkommen und geringem Ausstattungsgrad der Fahrzeuge Reisezeiten schlechter sein können, als ohne CACC. Separate CACC-Spuren einzurichten, scheint erst bei hohem Verkehrsaufkommen und

einer großen Marktdiffusion von CACC lohnenswert, da sonst auch negative Wirkungen zu erwarten sind und gleichzeitig die Investitionen für den Ausbau hoch sind [11]. Für den Ausbau spricht, dass für dieses Betriebskonzept die deutlichsten Wirkungen, bei hoher Verkehrsstärke und hohem Ausstattungsgrad der Fahrzeuge, von VISSER als auch im EFAS-Projekt ermittelt worden sind.

Es gibt neben den Einzelbetrachtungen der Effekte durch ACC und CACC auch vergleichende Untersuchungen beider Systeme:

Die untersuchten Wirkungen von ACC und CACC im Vergleich:

XU zeigte durch Simulationen von ACC und CACC, dass die Geschwindigkeitsunterschiede durch Interaktion mit dem Verkehr bei CACC eine geringere Breite aufwies als bei ACC. Die Beschleunigungsvorgänge sind harmonischer, die erreichte durchschnittliche Geschwindigkeit höher, die Verzögerungsvorgänge werden kontrollierter (das heißt weniger stark in $-\frac{m}{s^2}$ gemessen) und in der Anzahl weniger [120].

In einer anderen vergleichenden Untersuchung wurden mit Simulationen die Wirkungen von ACC und CACC auf die Kapazität bei unterschiedlichen Diffusionsgraden ermittelt. Bei vollständiger (100-prozentiger) Diffusion für Pkw (jeweils von ACC und CACC) würde sich laut der Studie im CACC-Szenario eine doppelt so hohe Kapazität ergeben wie im ACC-Szenario [110]. Das ist jedoch ein außergewöhnlich hoher Wert für die Kapazitätssteigerung und ordnet sich nicht in die Ergebnisse anderer Untersuchungen ein.

2.7. Zusammenfassung zu den Wirkungen von CACC

Fahrerassistenzsysteme erfahren viel Forschungsaktivität im Bereich der Implementierung, der Weiterentwicklung sowie in der Untersuchung der Wirkungen. ACC ist ein am Markt vorhandenes System und häufiger in seinen Wirkungen untersucht als CACC, welches sich gerade in der Testphase befindet. Aus diesem Grund wurden, ergänzend zu CACC, auch die Wirkungen von ACC aufgeführt.

Das ermittelte Wirkungsspektrum beider Systeme ist das Gleiche. Bei der Einzelbewertung der Effekte als auch in vergleichenden Untersuchungen stellt sich heraus, dass sich die Wirkungen von ACC beim System CACC verstärken.

Für die Reisezeit ist ermittelt worden, dass der Durchdringungsgrad und das Betriebskonzept (auf einer separaten CACC-Spur versus im gemischten Verkehr) wesentlichen Einfluss auf die durchschnittliche Geschwindigkeit und die Kapazität einer Strecke haben.

Die Wirkungen auf den Kraftstoffverbrauch betreffen führende und folgende Fahrzeuge. Erwartungsgemäß sind die Einsparungen bei den Folgefahrzeugen deutlicher als beim Führungsfahrzeug. Durch die aufgeführten Untersuchungen kann eine Kraftstoffersparnis von 10 Prozent konstatiert werden. Da Führungs- und Folgefahrten unter den Fahrzeugen etwa gleich verteilt werden, könnte dieser Wert bei längerer Betriebsdauer von CACC als Durchschnitt für alle ausgestatteten Fahrzeuge angenommen werden.

Die Sicherheitsgewinne durch automatisches Fahren (mit einem Chauffeur-Assistenten) sind proportional zum Ausstattungsgrad, wobei Unfälle mit Sach- und Personenschäden gleichermaßen vermieden werden. Die Wirkungen von ACC auf die Sicherheit sind ähnlich ausgewiesen. Das rechtzeitige Reagieren im Verkehr durch die Automatisierung kann die Unfallquote wesentlich senken, fast unabhängig davon, ob ACC oder CA oder CACC eingesetzt wird. Die Fragen nach der Zuverlässigkeit des Systems und den juristischen Folgen bei Systemausfällen oder Einzelereignissen, wie platzenden Reifen während einer Konvoifahrt, und damit verbundene Haftungsfragen sind bis auf wenige Arbeiten von den Betrachtungen der Sicherheitseffekte ausgeschlossen.

Als Übersicht zu den ermittelten Effekten von CACC können folgende Wirkungen aufgelistet werden:

- veränderte Anzahl von Schockwellen (stabilisierter Verkehrsfluss),
- veränderte Kapazität von Strecken,
- veränderte Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge,
- veränderte durchschnittliche Geschwindigkeit,
- veränderte Kraftstoffverbräuche,
- sowie Einflüsse auf die Sicherheit.

Ein weiterer Aspekt bei den dargestellten Wirkungen ist die Abhängigkeit der Wirkung von weiteren Parametern. Der Parameter *Fahrzeugabstand* beeinflusst die Wirkung *Kraftstoffverbrauch*. Für alle anderen Wirkungen ist der Durchsetzungsgrad bzw. der Anteil ausgestatteter Fahrzeuge der Parameter, der die Wirkung beeinflusst.

Die Wirkungen und deren Parameter werden bei der Entwicklung der Methode in Kapitel 4 berücksichtigt.

2.8. Fazit zur Telematik

Die Telematik kann als eine Rahmenbedingung des (Güter-)Verkehrssystems mit großem Einfluss betrachtet werden. Eine Zukunft des Verkehrsablaufs ohne Fahrerassistenzsysteme, die mit anderen Fahrzeugen und der Infrastruktur interagieren, scheint nach vielen Aussagen in der Literatur unwahrscheinlich. Auch andere Telematikanwendungen werden vermehrt in logistischen Prozessen eingesetzt wie im Flottenmanagement, in Laderaum-optimierenden Systemen, im Supply Chain Event Management etc. Von vielen Akteuren wird an einer Förderung der Diffusion von Telematik im Markt gearbeitet, was die (Teil-)Automatisierung von Fahrzeugen und des Verkehrsablaufes sowie die in der Logistik hochgradig eingesetzte Telematik als ein mittelfristig realistisches Zukunftsszenario erscheinen lässt.

Insbesondere der professionelle Güterkraftverkehr könnte, bei den kurzen Fahrzeuglebenszyklen und der expliziten Förderung durch Verbände, Versicherungen und öffentliche Einrichtungen, relativ schnell von CACC durchdrungen werden, wenn diese Technologie für den Straßenverkehr zugelassen ist. Untersuchungen zu den Rahmenbedingungen Kosten, Umsetzung, Recht, Akzeptanz und weiteren erfolgen für CACC aktuell. Somit sind Fahrerassistenzsysteme in der makroskopischen Verkehrsmodellierung unabdingbar, insbesondere wenn Aussagen über einen zukünftigen Verkehrszustand erstellt werden.

Der Wertebereich von Wirkungen ist in dieser Arbeit dargestellt worden. Die beschriebenen Simulationen, qualitative Arbeiten und Versuche auf Teststrecken führten zu überwiegend positiven Wirkungsabschätzungen in der Fachwelt.

Es muss jedoch auch konstatiert werden, dass bei den Untersuchungen der Wirkungen unterschiedliche Methoden angewandt wurden. Das Spektrum reicht von qualitativen bis quantitativen Aussagen, basierend auf Abschätzungen, Simulationen und Feldversuchen. Auch die Randbedingungen von Systemen in den Studien unterscheiden sich voneinander: Anzahl der Fahrstreifen, die Verkehrssituation, Lkw-Anteile, Konvoilängen etc. Ein Vergleich der Wirkungen ist daher schwierig und konsolidierende Darstellungen zu ACC und CACC fehlen bislang in der Literatur.

Die Ermittlung funktionaler Zusammenhänge zwischen Ausstattungsgrad bei Lkw und Reisezeit ist für das System CACC noch nicht durchgeführt worden. In der Fachwelt existieren derzeit quantifizierte Wirkungen für einzelne Szenarien. Die Ermittlung von Reisezeit- und Kapazitätseffekten bei einer Ausstattung nur von Lkw mit CACC ist bisher noch nicht geschehen. Es fehlt bei dieser Wirkung aktuell die empirische Basis für deren

Integration in die makroskopische Verkehrsmodellierung. Damit ist neben der Anforderung, die Wirkungen in die makroskopische Modellierung zu integrieren, eine weitere Forschungslücke identifiziert: **Der funktionale Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke, Lkw-Anteil und CACC-ausgestatteten Lkw ist noch zu ermitteln.** Dies wird in Kapitel 6 thematisiert und umgesetzt.

3. Die Grundlagen der makroskopischen Verkehrsmodellierung

Für den Erkenntnisgewinn über komplexe Systeme sind in der Wissenschaft Modelle ein zentrales Hilfsmittel, da das Realverhalten oft nicht vollständig untersucht werden kann. Bei der Modellierung beschränkt man sich auf die Abbildung der wesentlichen beschreibenden Merkmale des untersuchten Systems [27; 99].

„Ein Modell stellt eine vereinfachte Abbildung eines Teiles der realen Welt dar und bezieht sich von einem bestimmten Standpunkt aus auf ein spezifisches Problem.“ [74]

Das Literaturstudium zum Thema Verkehrsmodellierung deckt eine Vielzahl von existierenden Modellierungsansätzen auf. Diese alle ausführlich darzustellen, würde den Umfang der Dissertation unverhältnismäßig ausdehnen, ohne dem Ziel zu dienen. Auf die Darstellung der Theorie zur mikroskopischen Modellierung wird an dieser Stelle vollständig verzichtet, da sie nicht Gegenstand des Untersuchungszieles ist. Darauf wird bei der Datenerhebung in Kapitel 6 vertiefend eingegangen, da sie ein Werkzeug der entwickelten Methode zur Integration der Wirkungen von Telematik in die makroskopische Verkehrsmodellierung ist. Die makroskopische Modellierung wird in den folgenden Kapiteln in ihrer Detailtiefe erläutert, um das Konzept zur Integration der Wirkungen von CACC nachvollziehbar zu machen. Sie wird auf der allgemeingültigen Ebene für Modelle des Personen- als auch des Güterverkehrs beschrieben. Mathematische Beweise und ausführlichere Dokumentationen zu den Modellierungsansätzen sind in den zitierten Lehrbüchern und Dissertationen nachlesbar. Auf ausgewählte Methoden der Modellierung wird genauer eingegangen, da sie die Integration von Telematikwirkungen in die makroskopische Modellierung vorbereiten. Die Darstellung der makroskopischen Verkehrsmodellierung (Angebot und Nachfrage) ist somit auf die zu entwickelnde Methode ausgerichtet.

3.1. Grundlagen der Verkehrsangebotsmodellierung

Unter Verkehrsangebotsmodellierung wird die Abbildung der Struktur von Verkehrsnetzen für die unterschiedlichen Verkehrsarten, wie öffentlicher Verkehr, individueller Verkehr etc., mit ihren spezifischen Eigenschaften verstanden.

Ein Werkzeug hierfür stellt die Graphentheorie dar. Graphen sind durch die Elemente Knoten und Kanten beschreibbar. Jedem Kantenelement wird ein Knotenpaar eindeutig zugeordnet. Die Bedeutung von Kanten und Knoten im Netzmodell ist vom jeweiligen Planungsfall abhängig.

Besitzen die Kanten einen Richtungssinn, werden sie als gerichtete Kanten bezeichnet. Besitzen sie keinen Richtungssinn, sind es dementsprechend ungerichtete Kanten. Mit dieser grundlegenden Eigenschaft werden Kanten in Netzmodellen im Allgemeinen eingesetzt als:

- Straßen, nach Fahrtrichtung getrennt,
- Knotenstrecken, welche Abbiegevorgänge innerhalb eines Straßenknotens ermöglichen, und
- Füllstrecken für die Einspeisung des Verkehrs in das Netz.

Ein Teil der Knoten im Netzmodell fungieren als so genannte Füllknoten. Alle Fahrten beginnen bzw. enden in ihnen. In gängigen Modellen sind das die Verkehrsbezirke, für welche die Verkehrsnachfrage berechnet wird [65; 99; 76].

Von dieser allgemeinen Darstellung der Funktion von Kanten und Knoten abweichend, können mit diesen beiden Grundelementen auch spezielle Modellierungsaufgaben, z. B. für den Öffentlichen Verkehr oder den Parkraum im Netz, beschrieben werden.

Die Verkehrsnetzmodellierung kann mit zwei prinzipiellen Ansätzen erfolgen: kanten- oder knotenorientiert. Werden Knoten als Hauptelemente und gerichtete Kanten eingesetzt, ist es die knotenorientierte Netzbeschreibung. Bei der kantenorientierten Netzmodellierung besitzt jede Kante ausschließlich einen Anfangsknoten und wird mit einem Anfangsknoten einer anderen Kante verbunden. Das kantenorientierte Konzept bietet Vorteile bei der Modellierung des öffentlichen Verkehrs [35]. Für andere Verkehrsarten ist die knotenorientierte Netzdarstellung gängige Praxis. Zur Verdeutlichung der Netzmodellierung

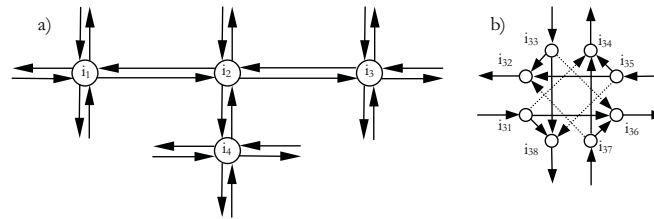


Abbildung 3.1.: Knotenorientierte Netzbeschreibung (a) und Abbiegevorgänge am Knoten i_3 (b)

[99]

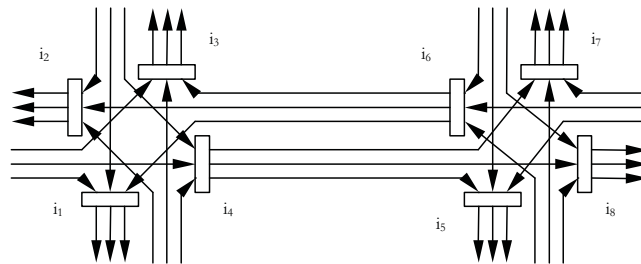


Abbildung 3.2.: Kantenorientierte Netzbeschreibung.

[99]

ist das knoten- und kantenorientierte Konzept in den Abbildungen 3.1 und 3.2 dargestellt.

Eine weitere Kernaufgabe der Angebotsmodellierung ist, neben der Netzdarstellung, die Attribuierung des Netzes. Durch geeignete Attribute lässt sich das Entscheidungsverhalten der Verkehrsteilnehmer modellieren. Entscheidungen, sowohl in der Realität als auch im Modell, werden beispielsweise für ein Ziel, ein Verkehrsmittel oder eine Route getroffen. Es gibt beim Entscheidungsverhalten in der Realität messbare (z. B. Reisezeit, Kosten) und nicht messbare Attribute (z. B. Präferenzen, Gewohnheiten), welche bei den Verkehrsteilnehmern zu einer Entscheidung führen. Im Modell müssen, weil nicht alle möglichen Attribute implementiert werden können, die maßgeblich relevanten Attribute für das Entscheidungsverhalten adäquat beschrieben werden [99].

Entscheidungen zwischen Alternativen sind in den meisten Fällen von mehreren Attributen dieser Alternativen abhängig. Beispielsweise kann die Wahl zwischen zwei Verkehrsmitteln für eine Fahrt von der Reisezeit, den Kosten, der Verfügbarkeit etc. abhängig sein. Zudem sind nicht alle Attribute gleich gewichtig. So könnte die Verfügbarkeit das wichtigste Kriterium sein. Die Kosten könnten auf Rang 2 stehen, gefolgt von der Reisezeit mit kleinem Einfluss und weiteren Attributen, die bei einer Entscheidung berücksichtigt werden. Man

benötigt im Modell deshalb ein Konstrukt, welches mehrere Attribute miteinander verbinden und gewichten kann und zusätzlich eine Präferenzordnung zwischen den Alternativen auf Basis der Attribute herstellt. In Verkehrsmodellen werden dazu Nutzenfunktionen eingesetzt.

Nutzenfunktionen wurden in der ökonomischen Entscheidungstheorie entwickelt und sollen dort komplexes Entscheidungsverhalten abbilden. Bei der Durchführung von Wegen (=Verkehr) entsteht im Allgemeinen nicht direkt ein Nutzen. Eine Ausnahme wäre der Spaziergang mit einem intrinsischen Nutzen. Vielmehr entsteht häufig der Nutzen für den Verkehrsteilnehmer erst am Zielort und der Verkehr ist ein notwendiges Mittel (z. B. tägliche Wege zum Arbeitsplatz). Deshalb wird im Verkehr nicht zwischen dem Nutzen von Alternativen, sondern zwischen deren Widerstand unterschieden. Im Modell gilt dabei die Annahme, dass für Verkehrsteilnehmer ein geringerer Widerstand besser ist als ein höherer. Für den Begriff Nutzenfunktion werden im Verkehrswesen die Begriffe Widerstandsfunktion, Aufwandsfunktion und generalisierte Kosten genutzt, was jeweils einer negativen Nutzenfunktion entspricht [76; 99; 84; 27]. Die Begriffe sind äquivalent und werden auch äquivalent in dieser Arbeit behandelt.

Widerstandsfunktionen ordnen jeder Alternative einen Widerstandswert zu. Dabei hat die Funktion die Aufgabe, eine Präferenzordnung herzustellen, indem die beste Alternative den geringsten Widerstandswert erhält. Eine Widerstandsfunktion kann eine beliebige mathematische Vorschrift sein. Im Verkehrswesen ist die additiv gewichtete Verknüpfung von Widerständen die gängige Form (siehe Gleichung 3.1).

$$W = \sum_i \alpha_{w_i} \cdot w_i \quad (3.1)$$

Der Anspruch an eine Widerstandsfunktion und deren Komplexität soll an einem Beispiel erläutert werden, da theoretische Abhandlungen bereits vielfach veröffentlicht worden sind, oftmals ohne eine allgemein zugängliche Transformation bereitzustellen.

Für einen Weg von einem Verkehrsteilnehmer von einer Quelle zu einem Ziel sollen drei Verkehrsmittel zur Verfügung stehen, das Rad, das Auto und der Bus (siehe Abbildung 3.3). Nun wurde vom Modellierer empirisch ermittelt, dass die Reisezeit t , die Reisekosten K und die Bequemlichkeit B die wesentlichen Attribute sind, nach denen die Verkehrsteilnehmer ihr Verkehrsmittel auswählen. Diese Attribute müssten demnach in einer Widerstandsfunktion U verknüpft werden: $U = f(t, K, B)$. Damit für keine Alternative ein methodischer Vor- oder Nachteil entsteht, sollten in den Widerstandsfunktionen jedes Verkehrsmittels

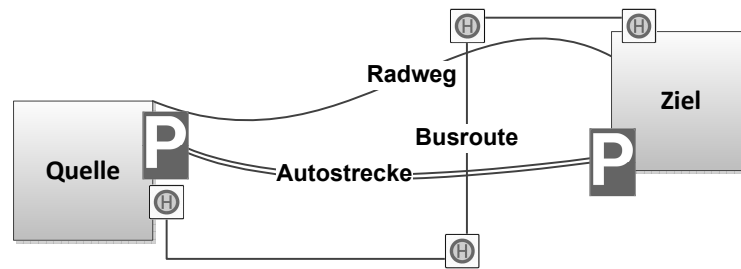


Abbildung 3.3.: Beispielhafte Alternativen für einen Weg

die gleichen Widerstände berücksichtigt werden. Als nächster Arbeitsschritt ist zu überlegen, wie die Attribute für die einzelnen Alternativen ermittelt werden können. Später wird diese Vorschrift im Verkehrsangebotsmodell hinterlegt, damit die Berechnung der Attribute automatisch und wiederholt erfolgen kann. Diese Vorschrift kann als Zielfunktion bezeichnet werden. Die Zielfunktion für die Reisezeit soll die Widerstände der Zugangszeit, der Fahrzeit und der Abgangszeit enthalten. Für die einzelnen Verkehrsmittel bedeutet das:

$$t(\text{Auto}) = t_{\text{Weg zum Auto}} + t_{\text{Fahrzeit}} + t_{\text{Parkplatzsuche am Ziel}} + t_{\text{Weg vom Auto}} = 10 \text{ min}$$

$$t(\text{Rad}) = t_{\text{Fahrzeit}} = 25 \text{ min}$$

$$t(\text{Bus}) = t_{\text{Weg zur Haltestelle}} + t_{\text{Fahrzeit}} + t_{\text{Weg von Haltestelle}} = 15 \text{ min}$$

Für das Attribut Kosten werden vereinfacht die direkten Fahrwegkosten angesetzt. Somit ergeben sich für die Verkehrsmittel beispielhaft:

$$K(\text{Auto}) = \text{Weglänge} \cdot \frac{\text{Verbrauch}}{\text{Kilometer}} \cdot \text{Literpreis} = 3 \text{ €}$$

$$K(\text{Rad}) = 0 \text{ €}$$

$$K(\text{Bus}) = \text{Ticketpreis} = 2 \text{ €}$$

Die ersten beiden Widerstände waren messbare Größen, der letzte, die Bequemlichkeit B ist nicht messbar. Angenommen, dass für den Modellierer auch hierfür Studien vorliegen (z. B. stated preference), die dem Auto die höchste Bequemlichkeit zuweisen, dem Bus halb so viel wie dem Auto und dem Fahrrad halb soviel wie dem Bus, so ergibt sich:

	W_1	W_2	W_3
Auto	14	30	13
Rad	29	0	100
Bus	19	60	34

Tabelle 3.1.: Widerstand von Alternativen mit verschiedenen Nutzenfunktionen

$$B(\text{Auto}) = 1$$

$$B(\text{Rad}) = 4$$

$$B(\text{Bus}) = 2$$

Jetzt muss eine Widerstandsfunktion gefunden werden. Die gängige Vorgehensweise in Verkehrsmodellen ist die additive Verknüpfung der Widerstände: $W_1 = \alpha_t \cdot t + \alpha_K \cdot K + \alpha_B \cdot B$. Eine in der Ökonomie verbreitete ist die Cobb-Douglas-Funktion: $W_2 = t^{\alpha_t} \cdot K^{\alpha_K} \cdot B^{\alpha_B}$. Ein dritter Vorschlag könnte vom Modellierer wie folgt erstellt werden: $W_3 = \alpha_B \cdot B(\alpha_t \cdot t + \alpha_K \cdot K)$. In diesem Beispiel sollen alle Widerstände gleich gewichtet sein ($\alpha_i = 1$).

Die Anwendungen der drei aufgeführten Widerstandsfunktionen unterscheiden sich im Ergebnis deutlich (siehe Tabelle 3.1). Es stellt sich zum einen eine unterschiedliche Präferenzordnung ein, zum anderen sind auch die Widerstände stark unterschiedlich. Würde der Verkehrsteilnehmer aus dem Beispiel das Verkehrsmittel mit dem geringsten Widerstand wählen, so wäre es jeweils ein anderes. Für eine solche Bewertung des Widerstandes wird der Widerstand transformiert. Die Transformation von Widerständen und die Entscheidung zwischen Alternativen sind jedoch Gegenstand der Nachfragemodellierung (siehe nächstes Kapitel). Im Angebotsmodell muss die Grundlage für die Entscheidung, der Widerstand, bereit gestellt werden.

Im Beispiel waren alle Widerstände statische Größen. Die Reisezeit mit dem Auto hängt jedoch auch davon ab, wie viele weitere Fahrzeuge sich auf der gleichen Strecke befinden. In makroskopischen Verkehrsmodellen wird die Reisezeit mittels CR-Funktionen berechnet, welche einen Startwert für die Reisezeit im leeren Netz ausgeben, als auch die Reisezeit bei zunehmender Fahrzeugbelastung ansteigen lassen.

Im Detail werden die CR-Funktionen im Kapitel 5 beschrieben, da sie für die Integration der Wirkungen von CACC ein bedeutender Bestandteil sind. An dieser Stelle wird das Konzept von CR-Funktionen nur soweit erläutert, wie zum Verständnis notwendig ist.

CR-Funktionen berechnen die Reisezeit aus der Beziehung zwischen der Verkehrsstärke q und der Kapazität einer Strecke¹ $f(q, q_{max}) = t$. In der Literatur sind CR-Funktionen für verschiedene Einsatzzwecke, wie beispielsweise Fernstraßen, Urbane Straßen oder lichtsignalanlagengesteuerte Knotenpunkte, formuliert worden.

Der reale Zusammenhang, dass bei steigender Verkehrsstärke die Reisezeit auf einer Kante zunimmt, wird durch CR-Funktionen mit variablen Widerständen² abgebildet. Der Anstieg der Reisezeit bis zur Kapazitätsgrenze ist bei jedem CR-Funktionstyp unterschiedlich und kann über Parameter der Funktionen angepasst werden. Im Bereich $q \approx q_{max}$ bzw. $q > q_{max}$ (in der Realität bedeutet das Stau) darf sich jedoch keine Durchlassbegrenzung ergeben, welche als absolute Kapazitätsgrenze wirkt. Die Begründung dafür ist, dass sich bei Modellen mit instationärem Verkehrsfluss, wie in makroskopischen Modellen, die CR-Funktion der Durchlassfähigkeit stetig nähert, da eine unendliche Prozessdauer betrachtet wird. Ein Abfluss der Fahrzeuge aus der Kante wird nicht explizit modelliert, sondern immer nur eine erneute Wahl von Kanten durch die Verkehrsteilnehmer [99]. In der Realität lösen sich Staus dann auf, wenn der Zufluss von Fahrzeugen in den Stau kleiner ist, als die Anzahl der Fahrzeuge, die aus der Staufront abfließen können. Das kann entweder durch eine geminderte Nachfrage (z. B. in der Zeit nach der Rush-Hour) oder durch eine veränderte Routenwahl (z. B. das Umfahren von Staus) geschehen.

Eine weitverbreitete CR-Funktion ist vom Typ BPR (Bureau of Public Roads) [102], welche in der Gleichung 3.2 dargestellt und in Abbildung 3.4 visualisiert ist.

$$f(q) = t_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{q}{q_{max}} \right)^\beta \right] \quad (3.2)$$

mit α und β als freie Parameter

Da die Reisezeit die einflussreichste Widerstandskomponente ist, ist die CR-Funktion das zentrale Sub-Modell zur Widerstandsberechnung. Widerstände und Widerstandsfunktionen sind ein äußerst bedeutender Bestandteil für die gesamte Modellbildung. Die Bedeutung der *richtigen* Widerstandsfunktion und das Zusammenspiel mit der Nachfragemodellierung wurden im Beispiel verdeutlicht. Im nächsten Kapitel wird ergänzend zur Angebotsmodellierung die Nachfragemodellierung behandelt.

¹ Strecken werden im Angebotsmodell als gerichtete Kanten bezeichnet.

² Es wurde auch eine CR-Funktion mit konstantem Widerstand $t = t_0$ formuliert. Im Allgemeinen besitzt diese in der Modellierungspraxis keine Relevanz.

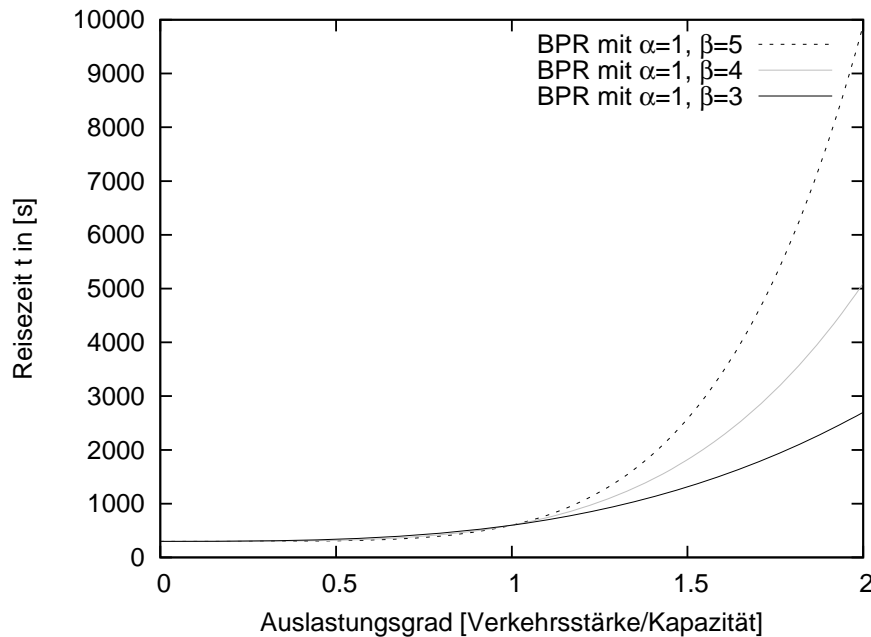


Abbildung 3.4.: CR-Funktion vom Typ BPR

3.2. Grundlagen der Verkehrsnachfragemodellierung

Unter den Begriff Verkehrsnachfragemodell werden gesamtwirtschaftliche und raumbezogene Nachfragemodelle subsumiert. Erstere bestimmen die aggregierte Nachfrage einer Region anhand von gesamtwirtschaftlichen Kenngrößen. Sie dienen überwiegend der Prognose für große Planungsräume. Die raumbezogenen Modelle ermitteln nach räumlichen Elementen disaggregiert die Verkehrsnachfrage zwischen Quellen und Senken des Verkehrs. Sie ermöglichen die Analyse der verkehrsinfrastrukturellen Nutzung [99].

Die in dieser Arbeit angestrebte Integration von CACC-Wirkungen in makroskopische Modelle wird sich auf raumbezogene Nachfragemodelle beschränken. Deshalb werden in diesem Kapitel ausschließlich diese behandelt.

Zur Berechnung der Nachfrage werden die vier Berechnungsstufen *Verkehrserzeugung*, *Zielwahl*, *Verkehrsaufteilung* und *Umlegung* bearbeitet. Sie werden in den folgenden Kapiteln sequenziell beschrieben, um das Konzept der Nachfragemodellierung zu verdeutlichen. Obwohl der sequenzielle Ansatz nicht *state of the art* ist, kann an ihm doch die grundsätzliche Beantwortung der in allen Modellen gleichen Fragen aufgezeigt werden: **Wieviele** Fahrzeuge

fahren **wohin**, als welches **Verkehrsmittel** und auf welcher **Route**? [74]. Weiterführende Ansätze dazu bieten beispielsweise [27] und [74] an.

3.2.1. Verkehrserzeugung

Verkehrserzeugungsmodelle bestimmen das Verkehrsaufkommen für jeden Verkehrsbezirk. Dabei wird zwischen Quellverkehr Q_i (Verkehr, der in einem Bezirk startet) und Zielverkehr Z_j (Verkehr, der in einem Bezirk endet) unterschieden. Das Verkehrsaufkommen ist abhängig von der Lagegunst L und/oder von Strukturgrößen S des Bezirkes. Somit ergeben sich die allgemeinen funktionalen Zusammenhänge, wie sie in den Gleichungen 3.3 und 3.4 aufgeführt sind [76; 65].

$$Q_i = f(L_{Q_i}, S_{Q_i}) \quad (3.3)$$

$$Z_j = f(L_{Z_j}, S_{Z_j}) \quad (3.4)$$

Es gibt drei verschiedene Ansätze, um das Verkehrsaufkommen zu ermitteln [65]:

Raumaggregatmodelle:

Diese Modelle berechnen das Verkehrsaufkommen auf Basis von aggregierten Strukturgrößen eines Verkehrsbezirkes und dem korrelierenden Verkehrsbedarf.

Individualverhaltensmodelle:

Bei diesen Modellen wird das Verkehrsaufkommen aus den Verhaltensweisen von Personen oder verhaltenshomogenen Personengruppen abgeleitet. Die Aggregation zum Verkehrsaufkommen eines Verkehrsbezirkes erfolgt über die Anzahl der jeweiligen Personen bzw. Personengruppen des Bezirkes.

Aktivitätenkettenmodelle:

Für diese Modelle werden aus Erhebungen dokumentierte Tagespläne in einer synthetischen Modell-Welt imitiert. Die Summe der durchgeführten Aktivitäten im Substrat ergibt das Verkehrsaufkommen und wird pro Verkehrsbezirk aggregiert.

Die mit einem der Ansätze berechneten Verkehrsaufkommen unterliegen der Annahme, dass der Verkehr, der ein Gebiet (den modellierten Raum) befährt, ihn nach endlicher Zeit auch wieder verlässt. Mathematisch ist diese Randsummenbedingung durch die Gleichung 3.5 ausgedrückt: Der Gesamtverkehr ist gleich der Summe des Quellverkehrs und ist gleich der Summe des Zielverkehrs. In weiterführenden Modellansätzen können die Randsummenbedingungen auch einseitig oder beidseitig nicht erfüllt werden (elastische Randsummenbedingungen).

$$V = \sum_i Q_i = \sum_j Z_j \quad (3.5)$$

Die Ansätze der Verkehrserzeugung sind nicht von modellinternen Eingangsvariablen abhängig. In diesem Sinne gibt es keine Rückkopplung zu den anderen Teilmodellen der Verkehrsnachfragemodellierung (Zielwahl, Verkehrsverteilung, Umlegung) oder zum Verkehrsangebotsmodell.

3.2.2. Zielwahl

Zielwahlmodelle berechnen die Verkehrsströme v_{ij} von den Quellbezirken zu den möglichen Zielbezirken des Planungsraumes für eine bestimmte Verkehrsart. Eine gerichtete Nachfrage resultiert.

Die Herausforderung bei der Verkehrsverteilung besteht darin, jene Kombination von Verkehrsströmen zu ermitteln, welche sich mit größter Wahrscheinlichkeit mit den realistischen Gegebenheiten deckt und gleichzeitig die Randsummenbedingung erfüllt.

Eine zufällige Verteilung der Fahrten auf der Matrix ergibt sich dann, wenn keine weiteren Informationen zur Berechnung genutzt werden. Das wird nur im Zufallsmodell umgesetzt, bei dem ausschließlich die Randsummenbedingungen erfüllt werden.

In allen anderen Modellen werden als zusätzliche Informationen die Widerstände aus der Angebotsmodellierung genutzt. Dazu werden die vorhandenen Widerstände bewertet. Formal bedeutet das, dass die gerichteten Verkehrsströme v_{ij} abhängig sind von der Anzahl der möglichen Quell- und Zielverkehre eines Bezirkes sowie der Bewertung des Widerstandes BW_{ij} zwischen den Verkehrsbezirken (siehe Gleichung 3.6) [76].

$$v_{ij} = f(Q_i, Z_j, BW_{ij}) \quad (3.6)$$

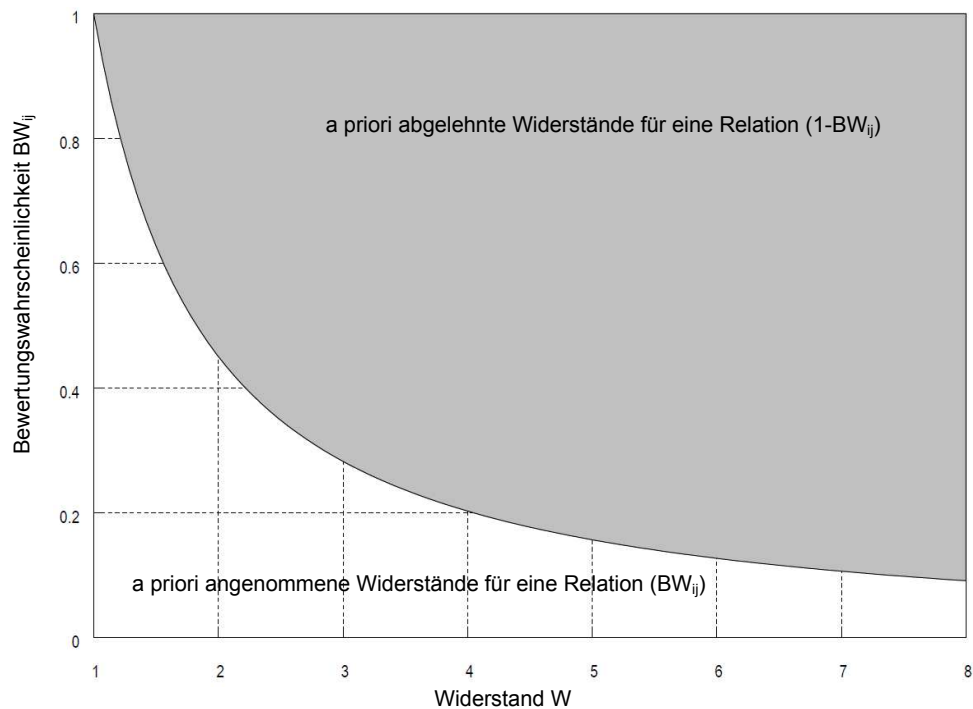


Abbildung 3.5.: Bewertungsfunktion für Widerstände zwischen einer Relation in Anlehnung an [76]

Die Bewertung drückt aus, dass eine Fahrt bei gegebenem Widerstand mit einer Wahrscheinlichkeit von BW_{ij} durchgeführt bzw. mit einer Wahrscheinlichkeit von $1 - BW_{ij}$ abgelehnt wird. Die Bewertungsfunktion ist im Allgemeinen so formuliert, dass mit zunehmendem Widerstand eine Relation abgelehnt wird (siehe Abbildung 3.5). Das dem newtonschen Gravitationsgesetz entlehnte Gravitationsmodell ist ein sehr bekanntes Beispiel für die Bestimmung der Bewertungswahrscheinlichkeit.

Zur Verteilung der Fahrten unter den genannten Randbedingungen können verschiedene Algorithmen eingesetzt werden. Der bekannteste von diesen ist der Algorithmus von *Furness*, der auch *Iterative Proportional Fitting* genannt wird.

3.2.3. Verkehrsmittelwahl

In dieser Modellierungsstufe werden die Verkehrsströme v_{ij} auf die im Modell implementierten Verkehrsmittel k aufgeteilt. Das kann, wie vom Verkehrsplaner jeweils umgesetzt, für Verkehrsträger (Straße, Wasser, Schiene, Luft), Verkehrsarten (Fuß, Rad, ÖV, IV) und/oder Fahrzeugtypen (Pkw, Nutzfahrzeuge etc.) geschehen. Die Wahl des Verkehrsmittels

wird von Faktoren des Verkehrsmittels (Angebot, Reisezeit etc.), des Verkehrsteilnehmers (Einkommen, berufliche Stellung etc.) und von Faktoren der Ortsveränderung (Zweck, Wahlfreiheit oder Gebundenheit etc.) beeinflusst. Der Widerstand, z. B. die Reisezeit, ist auch bei der Verkehrsmittelwahl zentral.

Die Zielwahl und die Verkehrsmittelwahl sind in der Realität nicht unabhängig voneinander, woraus zwei unterschiedliche Herangehensweisen für die Modellierung resultieren: Trip-End-Modelle und Trip-Interchange-Modelle [76].

Im Trip-End-Ansatz werden die Fahrten erst auf Verkehrsmittel aufgeteilt und anschließend die Zielwahl berechnet. Die Bestimmung des Modal Splits erfolgt mittels Faktoren aus repräsentativen Stichproben. Die Multiplikation der Faktoren mit den Verkehrsaufkommen der jeweiligen Verkehrsbezirke im Planungsraum bestimmt v_k . Im weiteren Modellierungsprozess würde mit einem Zielwahlmodell die Verkehrsstrommatrix je Verkehrsmittel v_{ijk} berechnet werden [76].

Trip-Interchange-Modelle hingegen berechnen aus den Verkehrsströmen v_{ij} mit Hilfe von Entscheidungsmodellen die *Wahl der Verkehrsmittel*. Die Wahl für ein bestimmtes Verkehrsmittel ist dann positiv, wenn dessen Widerstand kleiner ist als bei den Alternativen. Der Widerstand wird bestimmt durch die subjektive Betrachtung von objektiven Merkmalen. Dazu existieren verschiedene Modellansätze wie Logit, Probit und weitere, welche mit stochastischen Wahlentscheidungen operieren [76; 27; 65].

3.2.4. Umlegung

Nachdem modelliert wurde, wieviel Fahrten, wohin und mit welchem Verkehrsmittel stattfinden, wird in der letzten Modellierungsstufe die Nachfrage auf das Verkehrsangebot verteilt. Drei Teilmodelle werden dazu eingesetzt und iteriert [35]:

Routensuchmodelle:

Es werden alle sinnvollen Routen zwischen den Quelle-Ziel-Relationen gesucht. Die gängigste Methode nutzt Suchbaumverfahren (oder als Alternative das Matrixverfahren) [65]. Suchbaumverfahren ermitteln Routen auf Basis der bestehenden Infrastruktur und der Widerstände der Infrastrukturelemente.

Man unterscheidet zwischen Best-Wege-Verfahren, die nur den widerstandsärmsten Weg zwischen Quelle und Ziel suchen, und Alternativ-Routen-Verfahren. Letztere finden neben dem besten (widerstandsärmsten) Weg weitere sinnvolle Wege.

Routenwahlmodelle:

Diese Modelle verteilen die Verkehrsnachfrage v_{ijk} auf die gefundenen Routen. Dazu wird der Widerstand von Routen als Funktion des Widerstandes bestimmt. Wird unterstellt, dass die Verkehrsteilnehmer den Widerstand der Routen kennen, nutzt man deterministische Verfahren, bei denen fixierte Eingangsvariablen eingesetzt werden. Kennen die Verkehrsteilnehmer den Widerstand nicht genau, so kommen stochastische oder auch quasi-stochastische Verfahren zur Anwendung. Zufallszahlen oder quasi-Zufallszahlen (veränderte, aber nicht zufällige Werte) werden als Eingangsvariablen genutzt [100].

Verkehrsflussmodelle:

In makroskopischen Modellen werden die Interaktionen von Fahrzeugen auf einer Route als kollektives Verhalten durch CR-Funktionen abgebildet (siehe dazu Kapitel 5) [65]. Dazu werden durchschnittliche Reisezeiten auf den Routen unter Berücksichtigung der aktuellen Verkehrsbelastung jeder einzelnen Strecke mit Hilfe der CR-Funktionen berechnet. Die Reisezeit ist der Widerstand, der an das Routensuchmodell zurückgegeben wird.

Die drei Teilmodelle werden solange iteriert, bis ein Abbruchkriterium erreicht ist. Dieses Kriterium bezieht sich auf die Differenz von Widerständen der belasteten Routen. Gleichgewichtszustände, welche das Festlegen und Erreichen eines Abbruchkriteriums beschreiben, sind im nächsten Kapitel thematisiert.

Auch die Umlegung nutzt Widerstände aus dem Angebotsmodell für die Berechnung. Das Modellkonstrukt aus Zielwahl, Verkehrsmittelwahl und Umlegung arbeitet somit rückkopplend mit dem Verkehrsangebotsmodell. Dabei werden Gleichgewichtszustände des Modells durch die Iteration angestrebt. Mit Erreichen eines Sollwertes wird der Iterationsprozess abgebrochen. Das nächste Kapitel erläutert den funktionalen Zusammenhang zwischen Angebots- und Nachfragemodell.

3.3. Rückkopplung von Verkehrsangebots- und Nachfragemodell

Es stellt sich in der Realität unter „vorgegebenen wesentlichen politischen, wirtschaftlichen, sozialen, regionalen und verkehrsstrukturellen Angeboten und globalen Rahmenbedingungen

näherungsweise (das) Gleichgewicht des Systems 'Verkehrsgeschehen - Gesellschaft' (ein).“ [76]

Ein makroskopisches Modell, bestehend aus Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodell, repräsentiert das System *Verkehrsgeschehen - Gesellschaft* in abstrakter Weise.

Bei der Modellierung soll sich ein erwartungsgemäßer Zustand einstellen. Das kann ein Gleichgewicht, das so genannte *Nutzergleichgewicht*, sein oder ein Optimalzustand für ein so genanntes *Systemoptimum*. Auszugleichen bzw. zu optimieren sind jeweils die Widerstände aus dem Verkehrsangebotsmodell. Welche der beiden Erwartungszustände als Abbruchbedingung zu Grunde gelegt wird, ist abhängig von der Planungsaufgabe.

Nutzergleichgewicht:

Das Nutzergleichgewicht bezieht sich auf das erste Wardrop'sche Prinzip. Dabei minimieren die Verkehrsteilnehmer ihren Widerstand bzw. maximieren ihren Nutzen. Das Gleichgewicht ist dann erreicht, wenn die Widerstände der benutzten Routen kleiner oder gleich den Widerständen der unbenutzten Routen sind. Kein Nutzer könnte im Gleichgewichtszustand seine Situation verbessern, ohne dass sich dadurch die Situation für andere verschlechtern würde.

Man kann weiter nach dem deterministischen und dem stochastischen Nutzergleichgewicht differenzieren. Beim ersteren liegen in der Theorie den Verkehrsteilnehmern vollständige Informationen zum Verkehrssystem vor, wie beispielsweise aktuelle Reisezeiten, Reisekosten etc. Für Entscheidungen werden diese genutzt, so dass sich ein deterministischer Zustand des Verkehrssystems einstellt. Für das stochastische Nutzergleichgewicht liegen keine vollständigen Informationen vor, so dass die Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer auf subjektiven Annahmen zum Zustand des Verkehrssystems basieren [10; 94; 100].

Systemoptimum:

Beim Systemoptimum wird der Widerstand im System nach zu definierenden Kriterien optimiert, z. B. die Reisezeit oder die CO_2 -Emissionen im Innenstadtbereich. Das entspricht im Kern dem 2. Wardrop'schen Prinzip. Der systemoptimale Zustand unterscheidet sich damit grundlegend vom Nutzergleichgewicht, weil einige Verkehrsteilnehmer Nutzenverluste für das Erreichen des Optimierungskriteriums akzeptieren müssen. Andere Verkehrsteilnehmer könnten dafür im Systemoptimum mehr Nutzen als im Nutzergleichgewicht erhalten [10; 94; 100].

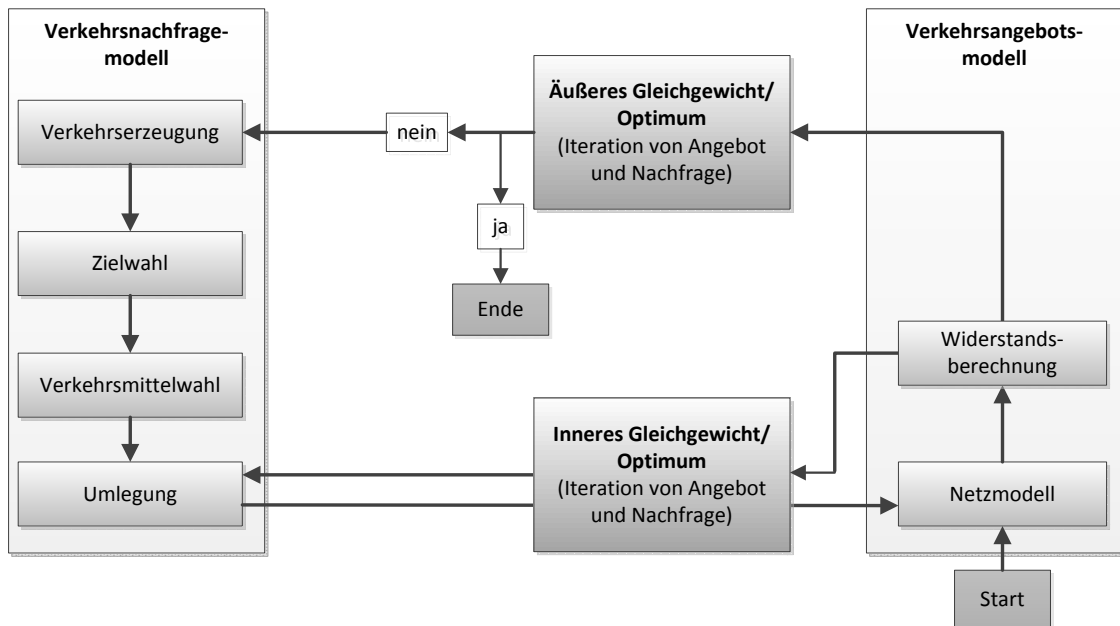


Abbildung 3.6.: Rückkopplungsprozess Verkehrsangebot und -nachfrage in Anlehnung an [99]

Das Nutzergleichgewicht und das Systemoptimum können im Modell jeweils als inneres oder als äußeres Gleichgewicht/Optimum erzeugt werden.

Der innere Zustand bezieht sich auf den Umlegungsprozess, der die berechnete Nachfrage auf das Netz legt. Die beschriebenen drei Teilmodelle der Umlegung (siehe Kapitel 3.2.4) werden solange iteriert, bis der Widerstand das Abbruchkriterium erreicht hat.

Die Modellierung des Gleichgewichts bei der Umlegung kann nach deterministischen oder stochastischen Regeln erfolgen. Bei der deterministischen Vorgehensweise kennen die Verkehrsteilnehmer alle vorhandenen Routen und deren Widerstände. Es herrscht vollständige Information aller Teilnehmer. Bei der stochastischen Vorgehensweise ist das nicht gegeben, weil die Informationen zwischen den Verkehrsteilnehmern variieren und auf dieser Basis andere Entscheidungen getroffen werden, als dies bei vollständigen Informationen der Fall wäre.

Der äußere Zustand bezieht sich auf die Rückkopplung des Angebotsmodellierungs- und des Nachfragemodellierungsprozesses. Dazu dienen die Widerstände aus der Angebotsmodellierung als Eingangsparameter für die Verfahren der Nachfragemodellierung.

Zur Verdeutlichung ist der beschriebene Zusammenhang zwischen Angebot und Nachfrage im Modellierungsprozess in Abbildung 3.6 dargestellt. Diese zeigt, dass die Verkehrsnachfragemodellierung (Zielwahl, Verkehrsmittelwahl und Umlegung) maßgeblich von

den Widerstandswerten beeinflusst wird. Die Bestimmung der Widerstände erfolgt in der Verkehrsangebotsmodellierung auf Basis der Verkehrsnachfrage. Beide Modelle, das Verkehrsangebots- und das Verkehrsnachfragemodell, bilden somit ein interdependentes System.

3.4. Fazit zur makroskopischen Verkehrsmodellierung

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen der makroskopischen Verkehrsmodellierung dargestellt. Die Stufen der Nachfragemodellierung, die Prinzipien der Angebotsmodellierung und auch das Zusammenwirken dieser beiden großen Modellteile wurden erläutert.

Mit den Ausführungen zur makroskopischen Modellierung von Verkehr und zu den Wirkungen von CACC sind die Grundlagen beschrieben, um einen Ansatz zu formulieren, mit dem die Wirkungen von CACC in die makroskopische Modellierung integriert werden kann. Dies erfolgt im nächsten Kapitel.

4. Methode zur Integration von Telematikwirkungen in die makroskopische Verkehrsmodellierung

In diesem Kapitel wird das Konzept beschrieben, mit dem die Wirkungen von Telematik in die makroskopische Modellierung integriert werden können. Nach der generellen Darstellung des Ansatzes wird das entwickelte Konzept für das Anwendungsbeispiel von Cooperative Adaptive Cruise Control konkretisiert.

4.1. Bestehende Ansätze zur Integration von Telematik in die makroskopische Verkehrsmodellierung

Um eine Weiterentwicklung auf dem Gebiet der Abbildung von Telematikwirkungen in der makroskopischen Verkehrsmodellierung zu ermöglichen, werden zuvor die bisherigen Ansätze zur Integration von Wirkungen in Modelle aufgezeigt.

Im Folgenden werden diese wenigen Projekte vorgestellt, welche die Wirkungen von Telematik in makroskopischen Modellen zum Gegenstand hatten.

Konsequenzen von IuK-Technologien für die Logistikprozesse und für die Verkehrswirtschaft[72]:

Dieses Projekt hatte zum Ziel, die Wirkungen von Telematik, eingesetzt in der Logistik, auf den Verkehr zu quantifizieren. Dazu wurde in einem ersten Schritt der Markt dahingehend analysiert, dass Telematikanwendungen, deren Leistungs- und Wirkungsspektrum sowie der Diffusionsgrad beschrieben wurden. Es wurden 17 Technologien in fünf Anwendungsgebieten von logistischen Prozessen untersucht und Aussagen zu den einzelnen Aspekten aus einer Unternehmens- und einer Verbandsbefragung

abgeleitet und gestützt. Weiterhin wurden Effekte der Telematikanwendungen in der Logistik auf Verkehrsprozesse analysiert und abgeschätzt. Schließlich sind diese Effekte in ein Verkehrsmodell dadurch implementiert worden, dass die Kenngröße *Fahrleistung* um entsprechend abgeschätzte Wirkungspotenziale abgesenkt wurde. Als Fazit der Modellrechnungen wird genannt, dass fein-differenzierte Modelle und eine auf die Modelle abgestimmte Datenlage bezüglich der Wirkungen von Telematik notwendig sind.

Modeling the Impact of Intelligent Transportation Systems on Surface Goods Movement in Canada [96]:

In dieser Arbeit wurden die Wirkungen im Straßen- und Schienengüterverkehr durch ITS bezüglich der Indikatoren Kosten und Reisezeit für Kanada bestimmt. Dafür wurde ein erweitertes Modal-Split-Modell und ein Einflussmodell aufgestellt, um die Wirkungen zu quantifizieren. Die Wirkungen im System wurden dann durch Multiplikation der Einzelwirkungen pro Indikator angesetzt. Bestandteil des Einflussmodells ist die Marktdurchdringung der Technologie. Angenommen wurde ein Durchdringungsgrad von Technologien, der für den damaligen IST-Zustand und für einen Prognosehorizont von fünf Jahren durch eine Befragung von Experten unterstellt wurde. Die Arbeiten der Jahre 1992 bis 1997 zur Telematik mit Wirkung auf den Modal Split, die Durchdringung in verschiedenen Marktsektoren und Gutarten für weitere 10 Jahre (1997 bis 2007) wurden in ein Modell integriert. Dem wurden Daten zu Wirkungen aus Expertenmeinungen zugrunde gelegt. Die Wirkungen wurden als Level of Service Model (Zeit und Kosten) und als erweitertes Modal-Split-Modell integriert. Dabei wurden Quelle-Ziel-Matrizen von verschiedenen Gutarten aus statistischem Material selektiert und durch Multiplikation mit einem angenommenen Durchdringungsgrad sowie einer abgeschätzten Wirkung, bezüglich der modalen Aufteilung, verändert. Es handelt sich dabei mehr um ein mathematisches Modell als um ein Verkehrsmodell im Sinne des 4-Stufen-Ansatzes.

Stärkung der Selbst-Organisation im Verkehr durch IuK-gestützte Dienste (OVID)[46]:

Das Ziel des Projektes bestand in der Untersuchung der Wirkungen von individualisierten Verkehrsinformationen. Die erwarteten Wirkungen betrafen eine verbesserte Selbstorganisation des Verkehrs. Die Modellierung erfolgte ausschließlich mit mikroskopischen Modellen. Besonders hervorzuheben an dem verfolgten Ansatz ist, dass

eine Rückkopplung der Verkehrsnachfrage mit dem Verkehrszustand erfolgte. Deshalb wird die Studie trotz des rein mikroskopischen Ansatzes hier aufgeführt.

Im Projekt wurde eine Simulationsplattform entwickelt, welche die Wirkungen von Verkehrsinformationen auf das Entscheidungsverhalten von Verkehrsteilnehmern abbildet. Die Nachfrage der Verkehrsteilnehmer wurde für den Personen- als auch den Güterverkehr mikroskopisch berechnet. Die Verkehrsinformationen wurden durch die Modellierung des Befolgungsgrades von Empfehlungen (Routen, Abfahrtszeiten und Verkehrsmittel) teils on- und teils pre-Trip in das System integriert. Der resultierende Verkehrsfluss wirkt wiederum auf die erteilten Verkehrsinformationen etc., bis ein Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage hergestellt ist.

Es kann festgehalten werden, dass die Wirkungen von Telematik in vielen Arbeiten untersucht wurden (siehe Kapitel 2). Zur Implementierung der Wirkungen in makroskopische Verkehrsmodelle gibt es jedoch erst wenige Arbeiten und diese mit stark vereinfachten Lösungen.

In [109] werden verschiedene Telematikanwendungen aufgeführt und jeweils die Möglichkeiten genannt, diese in den mikroskopischen Modellen CORSIM, AIMSUN2, INTEGRATION oder CONTRAM-I zu simulieren und somit die Wirkungen zu bestimmen. Es wird gezeigt, dass die Telematikanwendungen von einem oder mehreren Modellen in unterschiedlicher Qualität abgebildet werden können. Den mikroskopischen Modellen werden für jede Maßnahme das Modell EMME/2 und dessen Möglichkeiten zur Abbildung der Telematikanwendung gegenübergestellt. EMME/2 ist für keine Maßnahme geeignet und repräsentiert den makroskopischen Vier-Stufen-Prozess, der in Kapitel 3 beschrieben wurde. Die makroskopische Verkehrsmodellierung ist [109] zufolge nicht in der Lage, Telematikwirkungen zu ermitteln. Mikroskopische Modelle hingegen haben oft bewiesen, dass sich mit ihnen Wirkungen von Telematik aus Simulationen bestimmen lassen.

Im nächsten Kapitel wird gezeigt, dass die makroskopische Verkehrsmodellierung die Wirkungen von Telematik auf die Verkehrsnachfrage abbilden kann.

4.2. Herleitung und Beschreibung der Methode

In einem makroskopischen Modell werden die Wirkungen auf Indikatoren wie Fahrleistung oder Verkehrsleistung durch veränderte Rahmenbedingungen des Verkehrssystems

ermittelt. Wichtige Rahmenbedingungen von makroskopischen Modellen sind demografische Faktoren (Anzahl der Einwohner, Erwerbstätigkeit), sozio-ökonomische Faktoren (Einkommen etc.), infrastrukturelle Faktoren (Fahrwege, erlaubte Geschwindigkeiten etc.) und ökonomische Faktoren (Treibstoffkosten, Fahrwegkosten oder BIP-Entwicklung). Die Rahmenbedingungen sind hier nicht vollständig aufgeführt. Ihre implementierte Anzahl und der Umfang der Berücksichtigung unterscheiden sich je nach Modellkomplexität und Modellierungszweck.

Rahmenbedingungen werden in makroskopischen Modellen zu unterschiedlichen Parametern in deterministische oder stochastische Form transformiert und beeinflussen in definierter Weise mit mathematischen Ansätzen und Verhaltensregeln das Modellergebnis. Das Verständnis zu den Wirkungszusammenhängen zwischen Verkehrsnachfrage und -angebot in einem makroskopischen Verkehrsmodell - bestehend aus den Stufen Verkehrserzeugung, Verkehrsmittel- und Zielwahl sowie Umlegung - wurde in Kapitel 3 hergestellt.

Die Grundannahme zur Integration der Wirkungen von Telematik in ein makroskopisches Modell ist, dass Telematik ebenfalls eine Rahmenbedingung des Verkehrssystems ist und als solche behandelt werden kann bzw. muss. Damit wird Telematik als ein beeinflussender Parameter im Modell berücksichtigt.

Um den neuen Parameter Telematik korrekt in das Modell einzubinden, müssen verschiedene Prüfschritte für die betrachtete Telematikanwendung erfolgen.

Als Erstes müssen die Wirkungen des Telematiksystems ermittelt werden. Es können pro Telematikanwendung unterschiedliche Wirkungen auftreten. Weiterhin ist es notwendig, die Parameter zu ermitteln, welche die Wirkungen beeinflussen. Das ist wichtig, damit nicht nur situative Wirkungen, z. B. für einen bestimmten Durchsetzungsgrad, in das makroskopische Modell eingehen, sondern durch die Wirkungsparameter die Wirkungshöhe ermittelt werden kann.

In einem nächsten Arbeitsschritt ist zu ermitteln, in welche makroskopischen Kennwerte die jeweiligen Wirkungen der Telematikanwendung eingebunden werden können. Makroskopische Kennwerte sind beispielsweise die Anzahl der Beschäftigten pro Verkehrszelle, die Einwohner einer Verkehrszelle, die Reisezeit, die Reisekosten oder auch Optimierungskriterien für Gleichgewichtszustände des Modells. Ziel dieses Arbeitsschrittes ist, jede Wirkung in geeignete makroskopische Kennwerte zu transformieren, so dass diese in Abhängigkeit von den Parametern der Telematikwirkung im Modell bestimmt werden.

Im letzten Arbeitsschritt sind Gesetzmäßigkeiten zu formulieren, mit denen die makroskopischen Kennwerte unter Einfluss von Parametern der Telematikwirkung gebildet werden. Die Kennwerte sind damit die Telematik-Parameter des Modells. In dieser Form kann Telematik in die bestehenden Regeln eingehen und somit die Wirkungshöhe der Telematikanwendung bestimmen. Beispielsweise wird die Anzahl der Wege durch die Telematikanwendung beeinflusst. Es würde dann der makroskopische Kennwert *Anzahl der Wege je Einwohner* mit den Gesetzmäßigkeiten der Telematikwirkungen erweitert.

Die Methode, die Wirkungen von Telematik in die makroskopische Verkehrsmodellierung zu integrieren, lässt sich als Drei-Stufen-Prozess formulieren:

1. Ermittle die Wirkungen der Telematikanwendung und deren wirkungs-beeinflussende Parameter.
2. Transformiere die Wirkungen in makroskopische Kennwerte.
3. Formuliere Gesetzmäßigkeiten von Telematikwirkungen für makroskopische Kennwerte.

Die Methode ist in der Abbildung 4.1 dargestellt.

Im folgenden Kapitel wird das allgemeine Modell zur Integration von Telematikwirkungen auf das System Cooperative Adaptive Cruise Control, eingesetzt bei Lkw über 12 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht und Sattelzugmaschinen, konkretisiert und angewandt. Der im folgenden Kapitel durchgeführte Prozess kann als Mustervorgehen für die Implementierung von Telematikwirkungen in die makroskopische Modellierung gelten und in dieser Form für jedes beliebige Telematiksystem wiederholt werden.

4.3. Operationalisierung der Methode am Beispiel von CACC

Die im vorangegangenen Kapitel entwickelte Methode zur Integration von Telematik in die makroskopische Verkehrsmodellierung wird nun in drei Stufen auf die Telematikanwendung CACC angewendet.

Stufe 1 der Methode:

Die in der Fachwelt bekannten und in Kapitel 2.6 aufgeführten Effekte von CACC sind:

4. Methode zur Integration von Telematikwirkungen in die makroskopische Verkehrsmodellierung

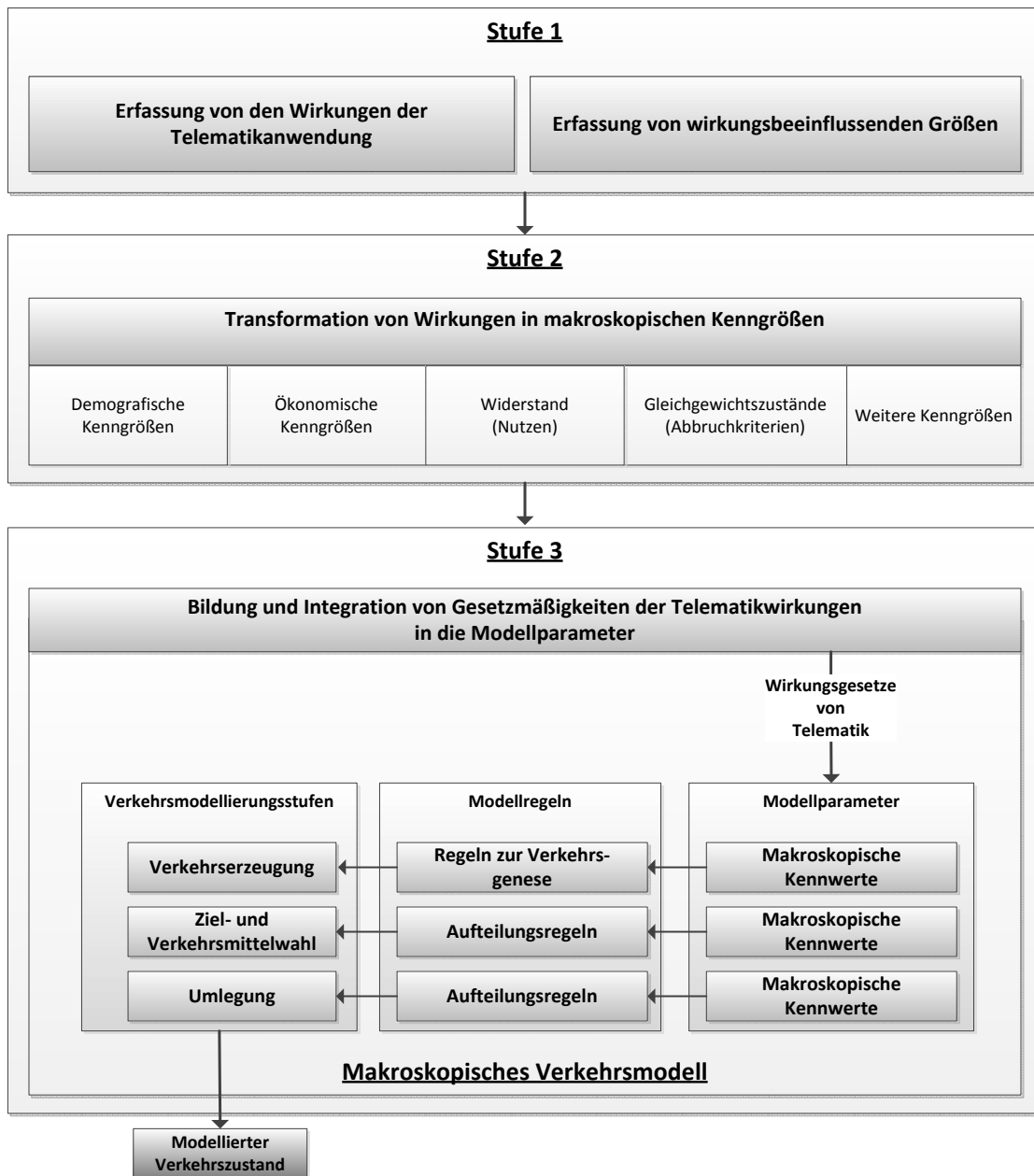


Abbildung 4.1.: Methode zur Integration von Telematik in die makroskopische Verkehrsmodellierung

- eine veränderte Kapazität der Infrastruktur,
- ein stabilisierter Verkehrsfluss,
- eine veränderte durchschnittliche Geschwindigkeit,
- veränderte Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge,
- veränderte Kraftstoffverbräuche sowie
- Einflüsse auf die Sicherheit.

Zuerst werden die Effekte von CACC nach dem Ursache-Wirkungs-Prinzip sortiert. Dazu kann festgestellt werden, dass eine geänderte Trajektorie keine Wirkung von CACC, sondern eine Ursache für die Wirkungen ist. Wird das Fahren automatisch vollzogen, werden Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge durch das System übernommen. Dadurch verändert sich das Fahrzeugfolgeverhalten, was die eigentliche Wirkung erzeugt. Weiterhin wurde in Kapitel 2.6 bereits beschrieben, dass die Anzahl von Schockwellen die Stabilität des Verkehrsflusses beschreiben. Deshalb sind Schockwellen ein Indikator für die Wirkungen *Kapazität der Strecke* und *durchschnittliche Geschwindigkeit*, jedoch keine Wirkung selbst. Aus diesem Grund können sie aus den Betrachtungen ausgeklammert werden, wenn die Kapazität und die durchschnittliche Geschwindigkeit direkt beschrieben sind. Das resultierende Ursache-Wirkungs-Prinzip für CACC-Effekte ist in der Abbildung 4.2 dargestellt. In den Block *Ursache* sind das automatische Fahren und das damit einhergehende veränderte Fahrzeugfolgeverhalten als Ursache für Wirkungen eingeordnet. Die im Block *Wirkungen* aufgeführten Effekte entsprechen den resultierenden Wirkungen des CACC-Systems. Schockwellen sind nicht aufgeführt, da sie innerhalb der durchschnittlichen Geschwindigkeit und der Kapazität wirken. Es verbleiben die Wirkungen auf den *Kraftstoffverbrauch*, die *Sicherheit*, die *Kapazität* und die *Reisezeit*¹

Die Parameter, welche die Wirkungen bestimmten, sind in Kapitel 2.6 bei der Darstellung der bekannten Wirkungen von CACC mit aufgeführt worden. Für die Wirkung *Kraftstoffverbrauch* war dies der Abstand der Lkw während der Fahrt. Für alle anderen Wirkungen ist der Anteil der ausgestatteten Fahrzeuge an der Gesamtheit der Fahrzeuge im Verkehr der beeinflussende Parameter.

Stufe 2 der Methode: Die zu modellierenden Wirkungen sind in der ersten Stufe

¹ Die Reisezeit und die Geschwindigkeit sind proportional ($v = \frac{l}{t}$), daher kann für das weitere Vorgehen die Reisezeit statt der Geschwindigkeit als Wirkung gewählt werden.

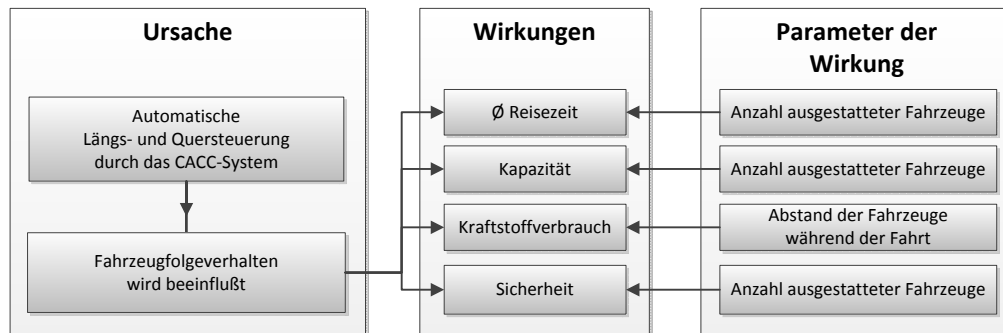


Abbildung 4.2.: Ursache-Wirkungs-Prinzip für die mikroskopischen Wirkungen von CACC

benannt und müssen in der zweiten Stufe der Methodik dahingehend untersucht werden, in welche makroskopischen Kennwerte sie eingehen und in diese transformiert werden.

Durchschnittliche Reisezeit:

Die Reisezeit in Sekunden, bedingt durch die höhere durchschnittliche Geschwindigkeit, ist in makroskopischen Modellen ein Parameter im Widerstand, welcher über CR-Funktionen ermittelt wird. Die Reisezeit muss demnach nicht gesondert transformiert, sondern kann mit dem bestehenden Mechanismus sehr gut integriert werden. Durch CACC wird der Parameter *Reisezeit* jedoch verändert, was eine spezifische Anpassung erfordert.

Durch weniger Fahrzeit werden auch Kosten eingespart. Das sind zum einen Kosten für den Fahrer, aber auch volkswirtschaftliche (externe) Kosten durch niedrigere Reisezeiten und geringere Transportkosten [7]. Die Kosteneinsparungen beim Fahrer durch weniger Fahrzeit sind marginal und können auf Seiten der Speditionen vernachlässigt werden. Es ist mittelfristig auch nicht zu erwarten, dass der Fahrer während der Fahrt Nebentätigkeiten durchführt [54] (seine Fahraufgabe somit auch juristisch vollständig abgibt), was demnach auch nicht zu Kosteneinsparungen führen kann. Externe Kosten sind als Aufwand formulierbar, der innerhalb der bestehenden Regeln wirkt (z. B. Umlegungsverfahren, welche ein Gleichgewicht anstreben).

Die Widerstände *Reisezeit* und *externe Kosten* müssen als Modellparameter angepasst werden, um diese Wirkung von CACC zu integrieren.

Kapazität:

Bei gleichbleibender Nachfrage (Anzahl der Fahrzeuge auf einer Kante) verändert die

gesteigerte Kapazität die Reisezeit, weil der Auslastungsgrad der Kante absinkt. Das ist in Abbildung 3.2 (Kapitel 3.1) zu erkennen, in der die Reisezeit in Abhängigkeit vom Verhältnis $\frac{q}{q_{max}}$ (= Auslastungsgrad) dargestellt ist. Im Fundamentaldiagramm (siehe Kapitel 5) wird dieser empirisch nachgewiesene Zusammenhang dargestellt. Der beeinflusste Widerstand beim Effekt *veränderte Kapazität* ist die *Reisezeit*. Einhergehend mit verringerter Fahrzeit ändern sich die *externen Kosten*, bei gleicher Argumentation wie bei der Wirkung *durchschnittliche Reisezeit*.

Die Wirkung von CACC auf die Kapazität einer Strecke kann ebenso wie die Wirkung *Durchschnittliche Reisezeit* durch veränderte Widerstände (Modellparameter) in makroskopischen Modellen abgebildet werden.

Kraftstoffverbrauch:

Eine weitere Wirkung von CACC betrifft den Kraftstoffverbrauch, der nach dem aktuellen Wissensstand verringert wird. Daher kann konstatiert werden, dass entweder die Kosten sinken, um eine Kante zu durchfahren, oder dass sich die fahrbare Distanz mit CACC zu gleichen Kosten erhöht, wie ohne CACC. Beides wären veränderte Widerstände in makroskopischen Modellen, die zur Integration dieser CACC-Wirkung dienen. Hier sollen die *Kosten* als Widerstand bestimmt werden, um eine dritte Widerstandsart, die Distanz, neben *Zeit* und *Kosten* zu vermeiden.

Will man die Wirkungskette von verringertem Kraftstoffverbrauch um eine Stufe erweitern, so sind auch die Emissionen betroffen, welche aus der Kraftstoffverbrennung resultieren. Emissionen sind externe Effekte des Verkehrs [51] und somit ist der entsprechende Widerstand als *externe Kosten* formulierbar.

Zur Integration der Wirkung *Kraftstoffverbrauch* sind die Modellparameter in Form von Widerständen anzupassen.

Sicherheit:

Die Wirkung *Sicherheit* bedeutet im Zusammenhang mit dem CACC-Einsatz die aktive Unfallvermeidung. Als Konsequenz von gesunkenen Unfallraten verringert sich zum einen das Risiko, an einem Unfall beteiligt zu sein und somit persönliche Kosten tragen zu müssen. Zum anderen sinkt aber auch die Wahrscheinlichkeit, dass ein Stau durch einen Unfall entsteht. Ein Stau würde Reisezeitverluste (Stauwartezeit) für alle Verkehrsteilnehmer auf der betroffenen Kante bedeuten. Eine dritte Perspektive besteht in den volkswirtschaftlichen Kosten eines Unfalls. Diese sind Stauzeitkosten (hier externer Effekt), Transportkosten, Emissionen, Verletzte und Sachschäden,

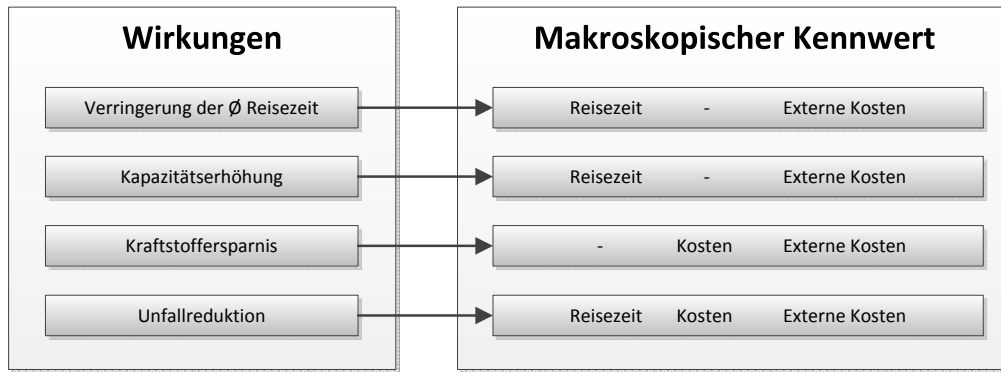


Abbildung 4.3.: Makroskopische Kennwerte zu den Wirkungen von CACC

welche durch den CACC-Einsatz verringert würden [2; 57; 51; 7].

Man kann die Wirkung *Sicherheit* somit durch die Widerstände *Zeit*, *Kosten* und *externe Kosten* ausdrücken.

In der Abbildung 4.3 sind die Wirkungen und die makroskopischen Kennwerte dargestellt, in welche sie transformiert sind. Alle Wirkungen von CACC können als Widerstände in Widerstandsfunktionen integriert werden. Es wurde deutlich, dass durch die Wirkungen von CACC nur drei Widerstände beeinflusst werden. Damit steigt die Komplexität der Widerstandsberechnung durch die Integration der CACC-Wirkungen nicht unverhältnismäßig an. Es werden die Modell-Parameter *Widerstände* in bestehenden Modellregeln (Widerstandsfunktion als Entscheidungskriterium im makroskopischen Modell) verändert und somit das Modell um die Wirkung von CACC erweitert.

Aus den beschriebenen Überlegungen resultieren drei Widerstände, welche nun formal in die Widerstandsfunktion integrierbar sind. Gemäß der Gleichung 3.1, in der die mit α gewichteten und in eine Einheit transformierten Komponenten des Widerstandes für einen Weg summiert werden, würde der Widerstand W und der durch CACC veränderte Widerstand W^{CACC} einer Kante formal wie folgt bestimmt:

$$W = \sum_i \alpha_{w_i} \cdot w_i = \alpha_t \cdot f_{Z_t} + \alpha_K \cdot f_{Z_K} + \alpha_{EK} \cdot f_{Z_{EK}} \quad (4.1)$$

$$W^{CACC} = \alpha_t \cdot f_{Z_t}^{CACC} + \alpha_K \cdot f_{Z_K}^{CACC} + \alpha_{EK} \cdot f_{Z_{EK}}^{CACC} \quad (4.2)$$

Mit f_{Z_t} , f_{Z_K} und $f_{Z_{EK}}$ (und äquivalent mit dem Index CACC) als Zielfunktionen für Reisezeit-Widerstände t, Kosten-Widerstände K und externe Kosten-Widerstände EK

sowie α_i als freier Parameter zur Gewichtung und zur Transformation der Einheiten. Zielfunktionen drücken eine Widerstandskomponente als funktionalen Zusammenhang von weiteren Elementen aus (siehe nächstes Kapitel).

Die Widerstandsfunktion wird nun im Detail mit den Wirkungen von CACC beschrieben und damit die Transformation der Wirkungen in makroskopische Kennwerte abgeschlossen.

Eine Zielfunktion enthält alle Widerstandskomponenten mit jeweils gleicher Einheit und kann für die Bestimmung der inneren und äußeren Gleichgewichte optimiert werden (Bildung des Minimums aus Nutzer- oder Systemperspektive (siehe Kapitel 3.3)). Jeder Zielfunktion kann bereits eine Summe von Widerständen zugrunde liegen, die individuell für jedes Modell bestimmt wird. Beispielsweise berücksichtigt ein Modell die Kaufpreise für Fahrzeuge, die Technologieanschaffungskosten und weitere Komponenten, andere Modelle nehmen Kosten sehr rudimentär an oder vernachlässigen diese. Beim Widerstand Reisezeit sind sowohl Zu- und Abgangszeiten für Verkehrsmittel als auch die Parkplatzsuche am Zielort weitere Beispiele für derartige Komponenten. In den nun folgenden Zielfunktionen werden nur die durch CACC-Wirkung beeinflussten Widerstände aufgeführt. Andere (Basis-)Widerstände sind vom Modellierer gewichtet einzufügen und in den Funktionen durch $\sum w_{Basis}$ ausgedrückt.

Konkretisierung von f_{Z_t} und $f_{Z_t}^{CACC}$:

Die Zielfunktion für die Zeit muss die Wirkungen aus der veränderten durchschnittlichen Reisezeit, der Kapazität und der Stauzeit durch Unfälle beinhalten.

Reisezeiten werden in der makroskopischen Modellierung mit CR-Funktionen beschrieben. Die CR-Funktion gibt als Funktionswert die Reisezeit aus, unter Berücksichtigung der Funktionsargumente Verkehrsstärke und Kapazität. Aus diesem Grund ist sie auch als Instrument geeignet, Wirkungen von CACC wiederzugeben. Kapitel 5 widmet sich dem Thema CR-Funktionen umfassend. Zum Funktionswert der CR-Funktion muss eine Komponente addiert werden, die eine Wartezeit für Staus durch Unfälle ausdrückt. Es ergeben sich die Zielfunktionen 4.3 und 4.4 für die Reisezeit im Szenario jeweils mit bzw. ohne CACC.

$$f_{Z_t} = \sum w_{Basis} + \alpha_{CR} \cdot t_{CR-Funktion} + \alpha_{Stau} \cdot t_{Stau} \quad (4.3)$$

$$f_{Z_t}^{CACC} = \sum w_{Basis} + \alpha_{CR} \cdot t_{CR-Funktion}^{CACC} + \alpha_{Stau} \cdot t_{Stau}^{CACC} \quad (4.4)$$

Konkretisierung von f_{Z_K} und $f_{Z_K}^{CACC}$:

Es sind zwei Komponenten der Zielfunktion für *Kosten* identifiziert worden: Einsparungen von Kraftstoff sowie weniger persönliche Unfallkosten.

Zu den Kraftstoffpreisen und zum Kraftstoffverbrauch müssen Annahmen bei der Modellierung getroffen werden. Diese könnten in der Zielfunktion entsprechend den CACC-Wirkungen reduziert werden. Dazu ist eine prozentuale Angabe aus den zitierten Forschungsprojekten nutzbar.

Die Wahrscheinlichkeit für Lkw an Unfällen beteiligt zu sein, sinkt für CACC-ausgestattete Fahrzeuge laut dem Forschungsstand stark. Die Unfallkosten werden von Versicherungen getragen. Somit werden für Lkw mit CACC die Versicherungskosten um einen konstanten Anteil sinken. Die durch das CACC-System eventuell höheren Fahrzeugkosten wären im Anschaffungspreis und damit im Basiswiderstand enthalten. Die Zielfunktionen für die Referenzsituation und für das CACC-Szenario sind in Gleichung 4.5 bzw. 4.6 benannt.

$$f_{Z_K} = \sum w_{Basis} + \alpha_{Kraftstoff} \cdot K_{Kraftstoff} + \alpha_{Versicherung} \cdot K_{Versicherung} \quad (4.5)$$

$$f_{Z_K}^{CACC} = \sum w_{Basis} + \alpha_{Kraftstoff} \cdot K_{Kraftstoff}^{CACC} + \alpha_{Versicherung} \cdot K_{Versicherung}^{CACC} \quad (4.6)$$

Konkretisierung von $f_{Z_{EK}}$ und $f_{Z_{EK}}^{CACC}$:

Externe Kosten sind monetarisierte Schäden, die nicht über Märkte kompensiert werden. Dies bedeutet, dass externe Kosten für die gesamte Gesellschaft entstehen und nicht den Verursachern angelastet werden [79]. Durch CACC können die externen Kosten des Lkw-Verkehrs gesenkt werden.

Die wichtigsten externen Kosten des Verkehrs sind laut der Studie IMPACT: Kosten durch Infrastrukturengpässe, Unfallkosten, Gesundheitskosten, Material- und Gebäudeschäden, Naturschäden als Folgen der Luftverschmutzung, Lärm, Klimawandel und Kosten für die Beeinträchtigung der Landschaft [79]. Bis auf die Faktoren Lärm

und Beeinträchtigung der Landschaft sind alle diese Kosten CACC-relevant. Das bedeutet, alle anderen werden durch die Wirkungen von CACC verändert.

Formal ergeben sich die Zielfunktionen nach Gleichung 4.7 und Gleichung 4.8.

$$f_{ZEK} = \sum w_{Basis} + \alpha_i \sum^i (I, U, G, MG, N, L) \quad (4.7)$$

$$f_{ZEK}^{CACC} = \sum w_{Basis} + \alpha_i \sum^i (I, U, G, MG, N, L)^{CACC} \quad (4.8)$$

Mit I = Kosten durch Infrastrukturengpässe, U = Unfallkosten, G = Gesundheit, MG = Material- und Gebäudeschäden, N = Naturschäden, L = Lärm.

Bei den Zielfunktionen wurde nicht berücksichtigt, dass *externe Kosten* auch zu *Kosten* werden können, indem sie internalisiert werden. Für ein Zukunftsszenario ist das in Teilen eine denkbare Entwicklung, jedoch auch ein großes, über die Dissertation hinaus gehendes Forschungsfeld. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass *externe Kosten* in bestimmten Szenarien auch als transformierte *Kosten* in die Widerstände eingehen können.

Die verschiedenen Zielfunktionen und deren Widerstandskomponenten sind nun vollständig beschrieben. Damit ist die zweite Stufe des Verfahrens für die Abbildung von CACC abgeschlossen.

Stufe 3 des Verfahrens:

Die einzelnen Widerstandskomponenten müssen gemäß der Methode in Abhängigkeit von den Parametern gesetzt werden, welche die Wirkung beeinflussen. Für den Kraftstoffverbrauch ist dies der Abstand der Fahrzeuge während der Fahrt und für die anderen Wirkungen die Anzahl der ausgestatteten Fahrzeuge.

Die Ermittlung der Gesetzmäßigkeiten der Telematikwirkung wird in dieser Arbeit auf den makroskopischen Kennwert *Reisezeit* beschränkt. Weil die Gesetzmäßigkeiten derzeit nicht für den Fall bekannt sind, dass das Telematiksystem CACC bei Lkw eingesetzt wird, werden in den Kapiteln 6 und 7 die Wirkungen erhoben und die Gesetzmäßigkeiten bestimmt. Die Reisezeit ist auch der wichtigste Widerstand in den bestehenden Verkehrsmodellen. Dies ist ein weiterer Grund, sich auf diese Wirkung zu konzentrieren.

4. Methode zur Integration von Telematikwirkungen in die makroskopische Verkehrsmodellierung

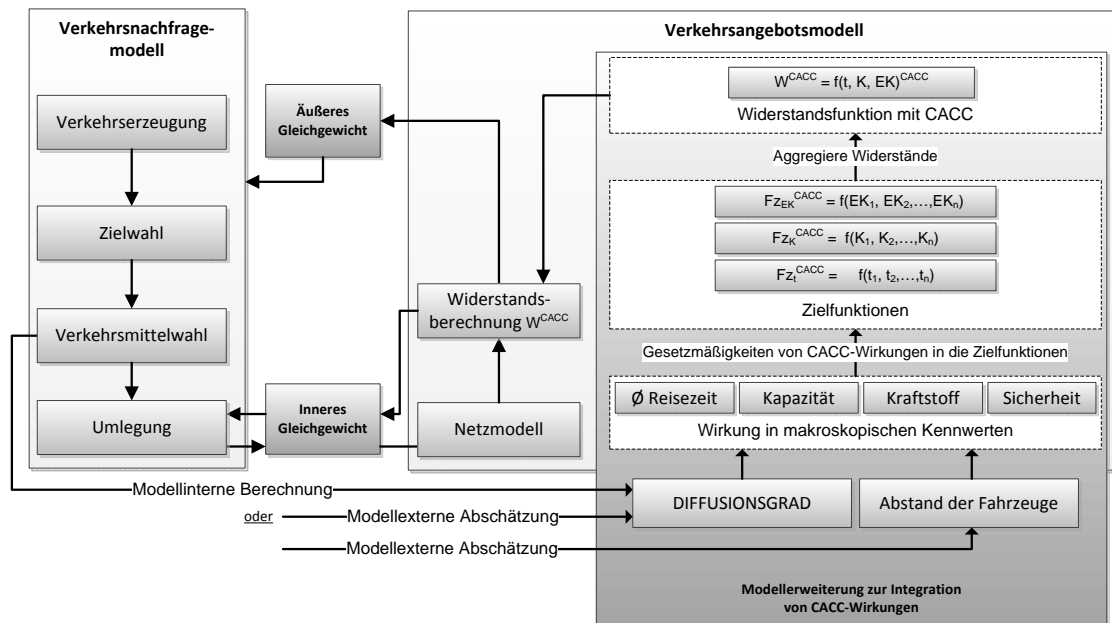


Abbildung 4.4.: Modellerweiterung um die CACC-Wirkungen

Die Erweiterung der makroskopischen Verkehrsmodellierung ist in Abbildung 4.4 dargestellt. Sie zeigt die Integration der Wirkungen von CACC in Form von Widerständen im Gesamtkonstrukt von Angebots- und Nachfragemodellierung. Der Diffusionsgrad ist der Parameter, welcher die Höhe der Wirkungen *Reisezeit*, *Kapazität* und *Sicherheit* bestimmt. Dieser kann entweder in einem Szenario auf einen bestimmten Wert festgelegt oder auch in der Verkehrsmittelwahl auf Grund der Eigenschaften (z. B. Kosten) des Systems bestimmt werden.

4.4. Diskussion der Methode für das Anwendungsbeispiel CACC

Die Methode, um Telematikwirkungen in makroskopische Modelle zu integrieren, ist als Drei-Stufen-Prozess formuliert worden. Alle drei Stufen der Methode wurden für den Anwendungsfall CACC beschrieben. Für CACC ist die Methode umsetzbar und aus der formal-theoretischen Sicht der makroskopischen Verkehrsmodellierung richtig, wie im vorangegangenen Kapitel gezeigt wurde. Ob sie auch inhaltlich richtig ist, wird nun diskutiert:

In der Abbildung 3.6 ist dargestellt, wie im Modell der innere und äußere Gleichgewichtszustand über den Widerstand hergestellt und wie dazu Ziel-, Verkehrsmittel- und Umlegungsergebnisse iteriert werden müssen. Dem folgend muss die Frage beantwortet werden, ob ein durch CACC verringerter Widerstand zu anderen Zielen, anderen Verkehrsmitteln und anderen Routen führen darf.

Die Beantwortung der Frage mit *ja*, kann wie folgt begründet werden:

Eine geringere Reisezeit, weniger Kraftstoffverbrauch und erhöhte Sicherheit steigern die Attraktivität einer Strecke gegenüber den Alternativen. Übersetzt in ein makroskopisches Modell bedeutet dies, dass sich der Widerstand für Kanten verringern würde, auf denen Fahrzeuge mit CACC fahren, und dass diese Kanten mit erhöhter Wahrscheinlichkeit von den Verkehrsteilnehmern gewählt würden (bzw. vom Umlegungsalgorithmus). Die Routenwahl erfolgt mit einem durch CACC veränderten Widerstand im Sinne der Erwartungen.

Wirkungen von CACC auf die Zielwahl sind nicht explizit untersucht. Wie jedoch in der Einleitung schon diskutiert wurde, sind Veränderungen der räumlichen und zeitlichen Verkehrsnachfrage durchaus bekannte Wirkungen von Telematik. Der Betrachtungszeitraum ist dabei langfristiger als beispielsweise bei der Routenwahl. Ohne das Ausmaß dieser Veränderungen tiefergehend zu betrachten, ist eine veränderte Zielwahl inhaltlich richtig. Sie zu quantifizieren, ist ein zusätzlich nötiger Forschungsaspekt.

Ebenso inhaltlich richtig ist, dass verkürzte Fahrzeiten, weniger Kraftstoffverbrauch und eine erhöhte Sicherheit die Attraktivität des Lkw (bzw. des Verkehrsträgers Straße) gegenüber Alternativen steigern. Auch ein veränderter Modal Split ist demnach sachlich richtig. Die Gewichtung und damit das Wirkungsausmaß des Widerstandes im Modell obliegen im Einzelfall dem modellierenden Verkehrsplaner.

Verkehrsziele, Verkehrsmittel und Routen werden theoretisch von den Widerstandskomponenten *Reisezeit*, *Kosten* und *externe Kosten* beeinflusst. Die praktische Bedeutung des Einflusses wird an dieser Stelle nicht weiter diskutiert. Sie kann je nach Aufgabenstellung und konkretem Modellansatz ausgeklammert oder gewichtet berücksichtigt werden (über α_i). Diese Entscheidung muss im Modellierungsprozess bei den Stufen Ziel- und Verkehrsmittelwahl, Routensuche und Routenwahl getroffen werden. Zusätzlich sollte bei der Verkehrsmittelwahl als Modellierungsmaßnahme das Verkehrsmittel Lkw_{CACC} für die Verkehrsmittelwahlentscheidung im Modell idealtypisch bereitgestellt werden. Diesem Verkehrsmittel werden andere Widerstände zugeordnet als dem konventionellen Lkw, worauf

das Modell entsprechend reagiert. Ein modellintern bereitgestellter Durchdringungsgrad von CACC wäre die Folge. Dieser könnte jedoch auch, unabhängig von der vorgestellten Methode, modellextern bestimmt und implementiert werden.

4.5. Fazit zur Integration der Wirkungen von CACC in die makroskopische Modellierung

Die makroskopische Modellierung kann die Wirkungen von CACC formal und inhaltlich korrekt über die Widerstandsberechnung berücksichtigen. Die Wirkungen können mit dem Ansatz sehr exakt in die makroskopische Modellierung überführt werden. Mit der beschriebenen Vorgehensweise stellt der Ansatz eine Erweiterung gegenüber den bereits durchgeführten Ansätzen der rein mikroskopischen Modellierung (siehe [46]) und dem rein makroskopischen Ansatz dar, der in [72] verfolgt wurde.

In Abbildung 4.4 ist die Modellerweiterung um die CACC-Wirkungen dargestellt. Dazu wurde die in Kapitel 3 beschriebene Grafik 3.6 um die Erkenntnisse aus diesem Kapitel erweitert.

Nachdem der Ansatz zur Integration von Wirkungen des Telematiksystems CACC ausformuliert worden ist, kann er durch die Parametrisierung von Daten umgesetzt werden. Dieser letzte Arbeitsschritt soll mit folgenden Begründungen auf die Widerstandskomponente $t_{CR-Funktion}$ in der Zielfunktion f_{Z_t} beschränkt werden. Der Kern der Dissertation ist die Formulierung eines Ansatzes zur Integration der Wirkungen von Telematik in die makroskopische Modellierung und dessen Konkretisierung am Beispiel für CACC bei Lkw. Dies wurde im aktuellen Kapitel abgeschlossen. Als Funktionstest für den Ansatz in aktuellen Modellen ist es hinreichend, die bedeutsamste Komponente des Widerstandes (die Reisezeit) und das zentrale Element der Widerstandsberechnung (die CR-Funktion) weiter zu elaborieren und die Wirkung mit Daten zu implementieren. Mit dieser beispielhaften Umsetzung entsteht zusätzlich ein wissenschaftlicher Mehrwert, da q-v-Daten unter Einfluss der Ausstattung von Lkw mit CACC bisher nicht erzeugt worden (in [1] wurden alle Fahrzeuge (Pkw und Lkw) ausgestattet). Sollten andere Widerstände wie externe Effekte, Unfallkosten, Unfallstauzeiten in aktuellen Modellen umgesetzt sein, können die Zielfunktionen vom Anwender/Modellierer mit den bereits publizierten Daten ebenso angepasst werden, wie es im folgenden Kapitel für die Reisezeit beschrieben wird.

5. Exemplarische Bestimmung der Widerstandskomponente Reisezeit

Wie in Kapitel 3 aufgezeigt wurde, ist die CR-Funktion als zentraler Ansatz für die Modellierung von Reisezeiten gängig und geeignet. Aus diesem Grunde wird nun vertieft auf das *Modell der CR-Funktionen* eingegangen.

5.1. Grundlagen der Reisezeitberechnung in makroskopischen Verkehrsmodellen

Die Erläuterungen und auch die Untersuchung in dieser Arbeit werden auf CR-Funktionen für Strecken eingeschränkt. Lichtsignalgesteuerte oder unsignalisierte Knotenpunkte, wie sie auf Landstraßen und innerorts vorkommen, sind ausgeklammert. Zu begründen ist diese Einschränkung damit, dass derzeit CACC-Systeme nur für den Einsatz auf Autobahnen konzipiert sind (siehe Kapitel 2.5 und 2.6). Auch unter der Voraussetzung, dass CACC-Systeme entwickelt werden, um auf anderen Straßentypen als Autobahnen eingesetzt zu werden, ist diese Einschränkung sinnvoll, denn der Lkw-Schwerlastverkehr findet überwiegend auf Autobahnen statt. Das zeigt die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke auf Bundesautobahnen verglichen mit den Bundesstraßen im Verlauf von 19 Jahre (siehe dazu die Abbildung 5.1. Es ist begründet davon auszugehen, dass auch zukünftig für Lkw die Autobahn als Verkehrsweg dominieren wird.

5.1.1. Das Fundamentaldiagramm der makroskopischen Verkehrskenngrößen

Verkehr kann man lokal und momentan messen. Eine lokale Messung vorzunehmen bedeutet, dass Indikatoren in einem Zeitintervall an einem Querschnitt einer Strecke erhoben werden.

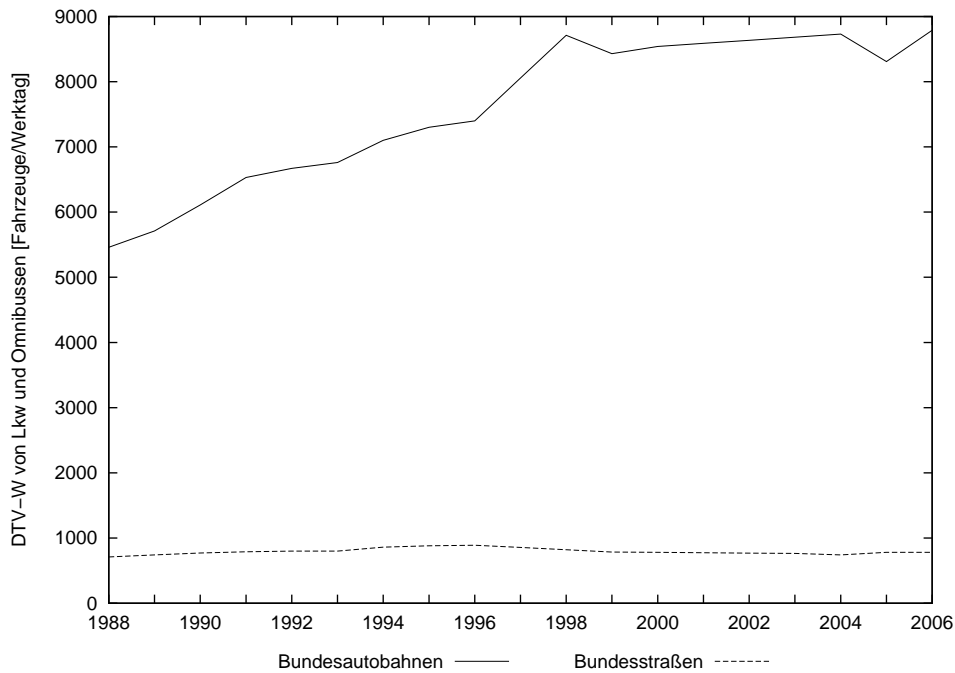


Abbildung 5.1.: Werktägliches DTW von Lastkraftfahrzeugen und Omnibussen auf Bundesautobahnen und -straßen in Anlehnung an [90]

Bei der momentanen Vorgehensweise dagegen werden Indikatoren zu einem Zeitpunkt auf einem Streckenabschnitt ermittelt [98]. Erhebt man die Verkehrsstärke q (lokal) $[\frac{Fz}{h}]$, die Verkehrsdichte k (momentan) $[\frac{Fz}{Km}]$ und die mittlere momentane Geschwindigkeit \bar{v}_m $[\frac{Km}{h}]$, besteht eine Fundamentalbeziehung zwischen diesen drei Indikatoren. Dieser Zusammenhang wird grafisch im Fundamentaldiagramm dargestellt und lautet mathematisch in der Kontinuitätsgleichung [36]:

$$q = \bar{v}_m \cdot k \quad (5.1)$$

Im Fundamentaldiagramm sind q , k und v an den Achsen abgetragen. In Abbildung 5.2 ist das Fundamentaldiagramm mit idealtypischen Verläufen der Graphen skizziert. Die durchgezogenen Graphen ergeben sich für den fließenden Verkehr und die gestrichelten für gestaute Verkehrsverhältnisse. Die Größe k_{opt} , die optimale Verkehrsdichte, bezeichnet die real maximal erreichbare Dichte an Fahrzeugen auf einer Strecke und den gleichzeitig gewährleisteten fließenden Verkehr. Bei der optimalen Verkehrsdichte ergibt sich die maximale Verkehrsstärke, die Kapazität einer Strecke. Diese kann nicht überschritten werden,

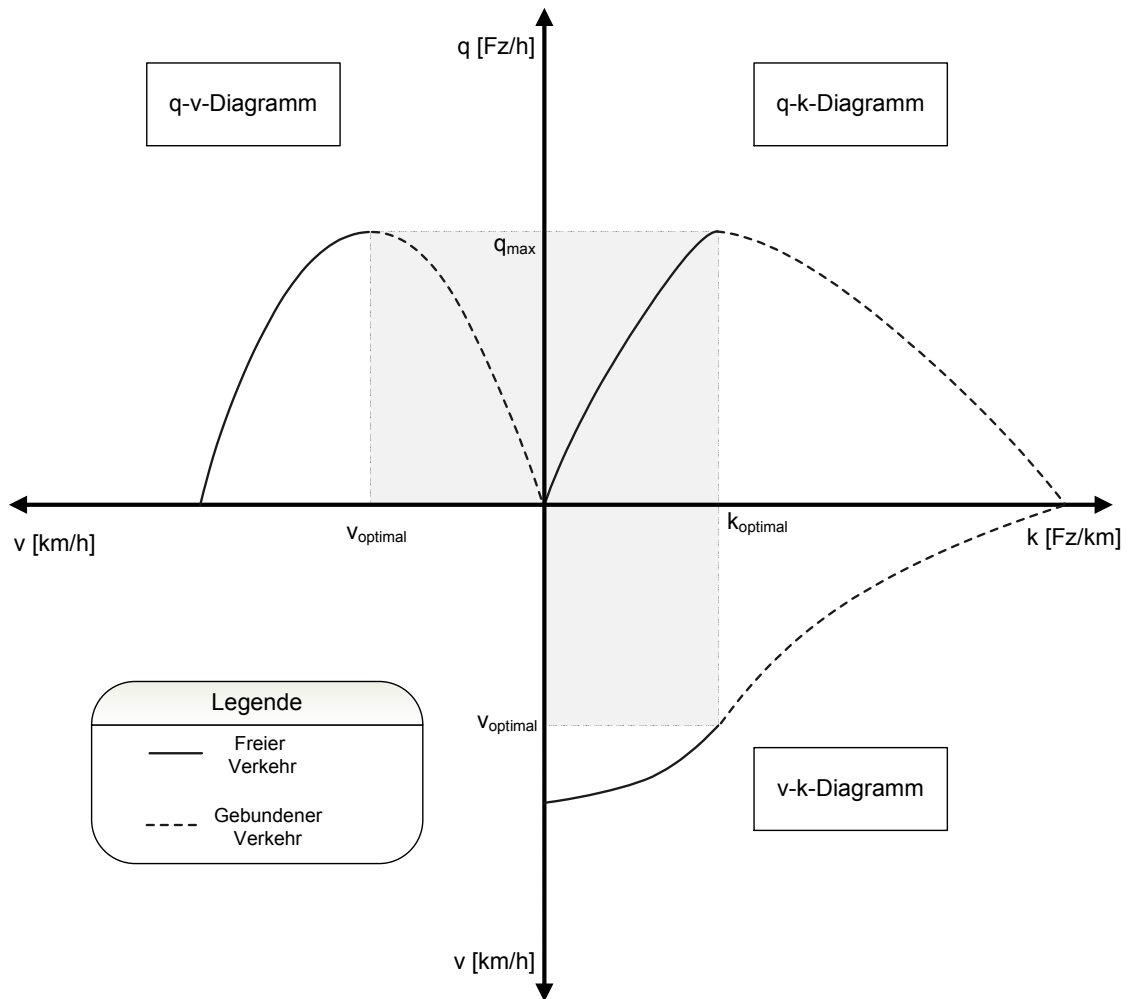


Abbildung 5.2.: Das Fundamentaldiagramm in Anlehnung an [36]

ohne dass der Verkehrsablauf sich staut. Für die optimale Verkehrsdichte und die maximale Verkehrsstärke ergibt sich im Fundamentaldiagramm eine optimale Geschwindigkeit, die niedriger als die maximale Geschwindigkeit ist [36].

Neuere Ansätze lösen die konstante Fundamentalbeziehung etwas auf und bestimmen Zusammenbruchswahrscheinlichkeiten des Verkehrs. Somit ist q_{max} variabel, entsprechend den Rahmenbedingungen auf der Strecke und kann sich in der Realität an die Kapazitätsgrenze einer Strecke nur annähern [16]. Als Rahmenbedingung der Kapazität einer Strecke wirken beispielsweise die Einflüsse Verkehrszusammensetzung, Fahrverhalten, Abstandsverhalten, Fahrwegeigenschaften, Wetter- und Lichtbedingungen [36].

Das Fundamentaldiagramm ist eigentlich ein dreidimensionales Diagramm mit einer Punktwolke aus drei gemessenen Werten (q , k und v). Projiziert man die Punkte auf die Achsenflächen erhält man ein zweidimensionales Diagramm mit drei Quadranten. In dieser Form wird das Fundamentaldiagramm meistens dargestellt. Betrachtet man jeden Quadranten einzeln, so ergeben sich ein q - k -Diagramm, ein v - k -Diagramm und ein q - v -Diagramm. Hier wird nur das q - v -Diagramm näher betrachtet, da dieses zu CR-Funktionen führt.

5.1.2. Das q - v -Diagramm

Misst man die Geschwindigkeit v und die Verkehrsstärke q über einen Streckenabschnitt, so zeigt sich durch die Punkte im q - v -Diagramm, dass mit zunehmender Verkehrsstärke die Geschwindigkeit immer stärker abnimmt. Der Graph beschreibt eine nach unten geöffnete Parabel. Dem entsprechend wurde als erster Ansatz zur mathematischen Beschreibung dieses Vorgangs eine quadratische Gleichung angesetzt. Bei genauerer Betrachtung der Messpunkte im Diagramm ist der quadratische Ein-Bereichs-Ansatz unzureichend.

Im q - v -Diagramm ergeben sich mehrere Bereiche, welche etwa bei q_{max} zusammentreffen. Diese könnten nicht durch eine stetige Funktion beschrieben werden, ohne dabei stark zu interpolieren. Deshalb wurden Mehr-Bereichs-Modelle eingeführt, die einzelne Funktionen zur jeweiligen Beschreibung der Bereiche nutzen (siehe Abbildung 5.3) [67; 8].

Ohne auf eine Vielzahl von existierenden Einteilungen des Verkehrsflusses nach den Zustandsformen des Verkehrsflusses einzugehen (siehe beispielsweise [36]), kann man die Bereiche wie folgt charakterisieren: Der erste Bereich beschreibt den stabilen Verkehrsfluss mit weitgehend für die Fahrer frei wählbarer Geschwindigkeit. Bei weiter zunehmender Verkehrsstärke nimmt die Geschwindigkeit ab, da der Verkehr zunehmend gebunden und

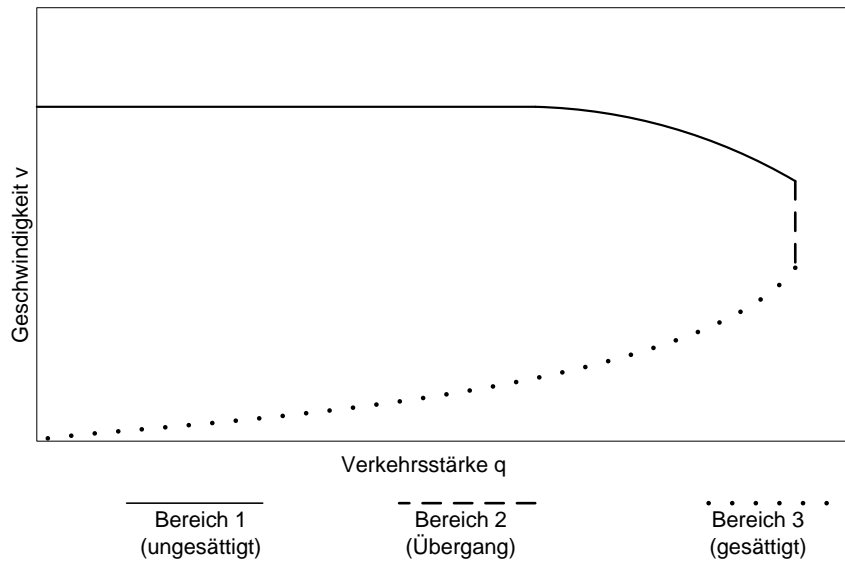


Abbildung 5.3.: Skizziertes Mehr-Bereichs-Modell
in Anlehnung an [8]

somit die Geschwindigkeit für die Fahrer nicht mehr frei wählbar ist. Damit nimmt auch die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs zu. Nach diesem metastabilen zweiten Bereich folgt der dritte, der instabile Bereich. Er ist von stockenden oder gestauten Verkehrsverhältnissen geprägt. Die maximale Verkehrsstärke wird im dritten Bereich überschritten (siehe Abbildung 5.3) [36].

CR-Funktionen haben ihren inhaltlichen Ursprung im q - v -Diagramm. In einer ersten Annäherung kann man festhalten, dass durch CR-Funktionen der Bereich 1 in der Abbildung 5.3 relativ exakt und die Bereiche 2 und 3 abstrahiert beschrieben werden. CR-Funktionen bilden ab, dass die Geschwindigkeit bei zunehmender Verkehrsstärke abnimmt. In den gängigen CR-Funktionen wird diese Gegebenheit nicht anhand der Geschwindigkeit, sondern anhand der Reisezeit diskutiert. Das geschieht über den einfachen physikalischen Zusammenhang:

$$t = \frac{l}{v} \quad (5.2)$$

Mehrere zusammengesetzte Funktionen sind dabei für die mathematische Abbildung des Zusammenhangs von q und v realistischer als eine Ein-Bereichs-Funktion und deshalb sinnvoller. Diese Aspekte werden im nächsten Kapitel behandelt.

5.1.3. Anforderungen an CR-Funktionen

An ein Kapazitätsbeschränkungsmodell bestehen zwei generelle Arten von Anforderungen: mathematische und real-verhaltensabbildende Eigenschaften. Die mathematischen Eigenschaften sind [63; 102]:

1. Stetigkeit (Funktion weist an jeder Stelle ihres Definitionsbereiches einen Funktionswert auf und hat keine Sprünge),
2. streng steigende Monotonie ($f(x_2) > f(x_1)$) und
3. Positivität ($f(x) \geq 0$).

Die ersten beiden Eigenschaften haben zur Folge, dass genau ein Funktionswert für ein q bei $f(x)$ existiert. Die dritte Eigenschaft verhindert, dass bei der Routenwahl, beispielsweise mit dem Dijkstra-Algorithmus, eine Kante als Beschleunigung eingeht, denn bei negativer Reisezeit „kostet“ das Befahren der Kante keine Zeit, man gewinnt sogar Zeit.

Diese drei Anforderungen würden dazu führen, dass die Funktion bei der Sättigung von eins unendlich sein müsste, wenn man berücksichtigt, dass bei einem Stau die Geschwindigkeit auf einer Kante nahe null ($\bar{v}_m \cong 0$) und damit die theoretische Reisezeit unendlich ist. Die CR-Funktion von WEBSTER beispielsweise bildet dies ab. Sie strebt gegen unendlich an der Stelle $\frac{q}{q_{max}} = 1$, wird aber nicht für Kantenwiderstände eingesetzt [76]. Die Erklärung dafür befindet sich in der Deduktion: Wenn die Wartezeit auf Kanten unendlich wäre, würde man eine unendlich andauernde Stausituation modellieren [99]. Bei der Umlegung wird für einen endlichen Zeitraum (oft über 24 Stunden) die Verkehrsnachfrage auf die Strecken verteilt. Je nach Umlegungsverfahren würde eine Strecke dann für den gesamten Umlegungszeitraum bei zu hoher Belastung 'gesperrt' sein. Die Realität zeigt, dass in der Regel die Verkehrsnachfrage im Tagesverlauf unterschiedlich stark ist (deutlich bei Vormittags- und Nachmittagsspitzen) und somit ein Stau immer endlich ist. Damit ergibt sich, dass eine CR-Funktion keinen über den Umlegungszeitraum andauernden Stau ausgeben darf. Weitere Argumente sind, dass die Verkehrsteilnehmer auf Strecken mit hoher Dichte oder niedriger realisierbarer Geschwindigkeit reagieren, indem sie Alternativstrecken wählen. Im Stadtverkehr führen die Erfahrungen der Verkehrsteilnehmer mit den verfügbaren Strecken dazu, dass sich eine Art gleichgewichtige Nutzung aller im Stadtgebiet verlaufenden sinnvollen Alternativstrecken einstellt [63].

Verbindet man die realen Verhaltensweisen mit den mathematischen Anforderungen an die Funktion, so ergibt sich der Graphen-Verlauf der CR-Funktion, der in Abbildung 5.4

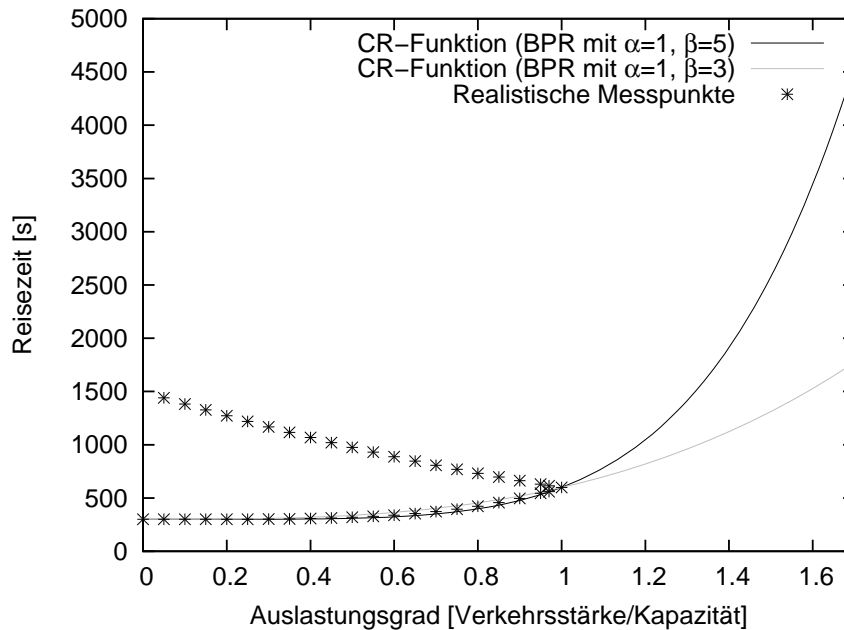


Abbildung 5.4.: CR-Funktion Real vs. Modell in Anlehnung an [63]

zu sehen ist.

Im Bereich $\frac{q}{q_{max}} > 1$ strebt die Reisezeit t nicht gegen unendlich, nimmt jedoch bei kleinen Änderungen von q stärker zu als im Bereich $\frac{q}{q_{max}} = 1$. Realen Daten zufolge steigt in dieser gestauten Situation die Reisezeit, ohne dass die Verkehrsstärke zunimmt. Der Graph wendet an der Stelle $\frac{q}{q_{max}} = 1$. CR-Funktionen sollen mit ihren Eigenschaften keinen Stauzustand nachbilden. In der makroskopischen Modellierung, bei der ein erwarteter Systemzustand (Gleichgewicht) hergestellt wird (vgl. 3), ist das nicht beabsichtigt. Die mikroskopische Modellierung kann dies leisten (siehe dazu z. B. [66]).

5.1.4. Gängige CR-Funktionen

Im Laufe der Modellierungspraxis wurden viele CR-Funktionen entwickelt. Einige davon sind für Spezialfälle konzipiert, um beispielsweise bestimmte Knotenpunktsignalisierungen, Wartezeiten oder Umlegungsverfahren zu modellieren. In Tabelle 5.1 sind gängige CR-Funktionen für Streckenreisezeiten aufgeführt. Die Tabelle ordnet die Funktionen nach den Dimensionen Funktionstyp und Bereichszahl. Das soll zum einen verdeutlichen, welche grundsätzlichen mathematischen Konzepte zur Formulierung einer CR-Funktion

Bereiche	Lineare Funktion	Potenzfunktion
EIN	Konstant	BPR Conical Akcelik Quadratisch Conical Marginal Yun, White, Lamb und Wu (freeway) Schiller Lohse
ZWEI	IRVIN, DODD, van CUBE I	BPR 2 BPR 3 INRETS Vatzek
DREI	IRVIN, DODD, van CUBE II	

Tabelle 5.1.: CR-Funktionen (für Strecken) nach Funktionstyp und Bereichsanzahl in Anlehnung an [89; 102; 63; 64; 76]

eingesetzt werden und zum anderen den Umgang mit den in der Realität festgestellten Mehr-Bereichen im q-v-Diagramm darstellen.

Jede CR-Funktion weist einen Stützpunkt auf. Dieser befindet sich an der Stelle $q = 0$, bei dem das Verkehrsnetz leer ist und eine Fahrzeit t_0 benötigt wird, um bei frei wählbarer Geschwindigkeit die Kante zu *durchfahren*. t_0 repräsentiert die durchschnittliche gewählte Geschwindigkeit auf der Kante. Die CR-Funktionen unterscheiden sich darin, ob sie keinen weiteren Stützpunkt (Ein-Bereichs-Modelle) oder weitere Stützpunkte besitzen (Mehr-Bereichsmodelle) [76]. Als mathematische Grundform werden zwei CR-Funktionstypen eingesetzt: lineare Funktionen und Potenzfunktionen.

Stellt man die mathematische Voraussetzung *Stetigkeit* für eine CR-Funktion den Mehr-Bereichs-Modellen gegenüber, so wird diese aus mathematischer Sicht wiederum nicht erfüllt. Die Ableitungen der Funktionen, welche in den jeweiligen Bereichen eingesetzt werden, besitzen einen unterschiedlichen Anstieg [99]. In der Modellierungspraxis ist das jedoch gelöst, indem sichergestellt wird, dass die Funktionswerte beider Funktionen an der Übergangsstelle (z. B. $\frac{q}{q_{max}} = 1$) gleiche Funktionswerte ausgeben und damit eine quasi-Stetigkeit gegeben ist.

In der Realität gibt es jedoch nicht nur einen generellen Zusammenhang zwischen der Anzahl der Fahrzeuge auf der Strecke und der Reisezeit, es ist auch bekannt, dass der Lkw-Anteil bei den Fahrzeugen diesen Zusammenhang zusätzlich beeinflusst. Die Reisezeit ist demnach abhängig von der Anzahl der Fahrzeuge und dem Lkw-Anteil auf einer

Strecke [15]. Eine CR-Funktion, welche den Einfluss des Lkw-Anteils auf die Reisezeit berücksichtigt, ist von den Autoren Yun, Wade, Lamb und Wu entwickelt und formuliert worden [122]. Die Funktion ist wie die gängige BPR-Funktion aufgebaut und wurde um den Term $(1 + T)^\gamma$ als Multiplikator erweitert. T ist dabei der Anteil der Lkw in der Verkehrszusammensetzung und entspricht einem Wert zwischen null und eins. Wäre der Lkw-Anteil 0 Prozent, ergäbe sich ein Faktor von eins und dieser hätte in der Gleichung keine Wirkung.

$$f(q) = \frac{v_0}{\left(1 + \alpha (1 + T)^\tau \left(\frac{q}{q_{max}}\right)^\beta\right)} \quad (5.3)$$

In ihrer veröffentlichten Form ist sie als $v = f(q)$ formuliert. In der Gleichung 5.4 ist sie in eine Funktion umgeschrieben, welche die Reisezeit angibt. Somit kann sie als CR-Funktion, beispielsweise in VISUM, mit folgender Bildungsvorschrift eingesetzt werden:

$$f(q) = t_0 \left(1 + \alpha (1 + T)^\tau \left(\frac{q}{q_{max}}\right)^\beta\right) \quad (5.4)$$

Eine CR-Funktion zu nutzen, welche den Lkw-Anteil berücksichtigt, ist für die Integration von Wirkungen des CACC-Einsatzes bei Lkw von besonderer Bedeutung. Die Nutzung ist eine Grundvoraussetzung, um CACC-Wirkungen abzubilden. Aus diesen Grund wird im Folgenden darauf vertieft eingegangen, indem die einzige bekannte CR-Funktion nach [122] auf ihre Eignung für den Einsatz bei der Integration von CACC-Wirkungen untersucht wird.

Die Parameter der CR-Funktion sind für HBS-Daten [15] ermittelt worden. Dazu wurde die Formel von der Geschwindigkeit auf die Reisezeit umgestellt (siehe Gleichung 5.4) und anschließend ein Fitting-Algorithmus angewendet, um die Parameter der Funktion zu finden. Der Algorithmus basiert auf der Methode der kleinsten Quadrate und stellt damit sicher, dass sich mit den gefundenen Parametern der Funktion die Daten am besten repräsentieren lassen. Die genutzten Anfangsreisezeiten ergeben sich entsprechend der Anfangsgeschwindigkeit im HBS je nach SV-Anteil [15].

Bei einem Lkw-Anteil von 0 Prozent zeigt sich bereits, dass der Funktionstyp BPR den Einfluss der Verkehrsstärke auf die Geschwindigkeit nach dem HBS nicht gut repräsentieren kann. Sucht man die Parameter der Funktion mit der Methode der kleinsten Quadrate (Fit)

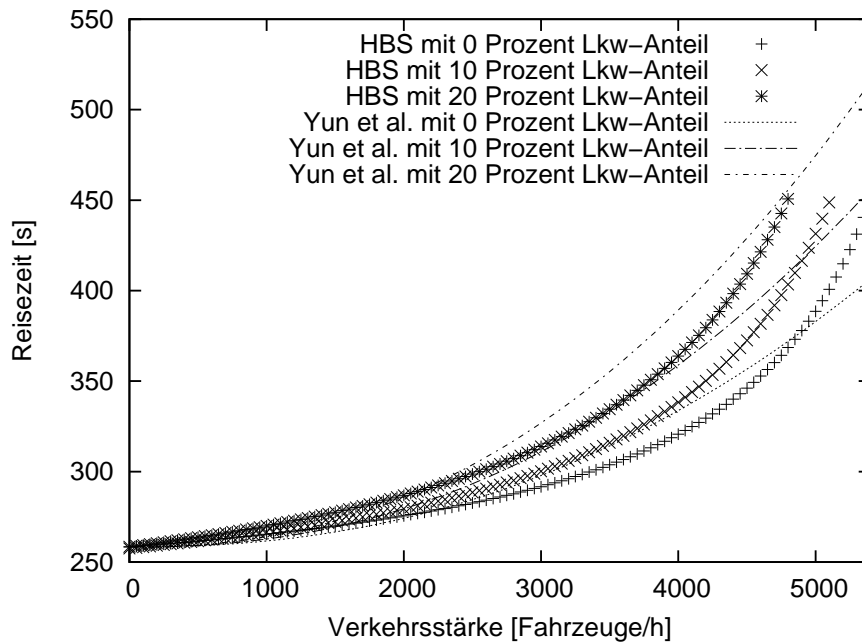


Abbildung 5.5.: Funktionsverlauf Yun, Wade, Lamb und Wu bei HBS-Daten Lkw-Verkehr

an gegebenen HBS-Daten für verschiedene Lkw-Anteile, so ergeben sich bis zur zweiten Nachkommastelle konstante tau-Werte ($\tau = 3,02102$ und $\tau = 3,02404$ für 20 % Lkw-Anteil). Jedoch sind die Abweichungen der Funktion von den HBS-Daten deutlich im Bereich von $\frac{q}{q_{max}} < 1$, also dem Bereich, in dem die CR-Funktion den realen Verlauf gut repräsentieren könnte. Die BPR-Funktion scheint somit für deutsche Autobahnen nur bedingt geeignet zu sein. Als Konsequenz muss eine andere Funktion für die Reisezeitbestimmung auf der Autobahn zugrunde gelegt werden.

Die Funktion von INRETS erweist sich als sehr passend, wenn man sie mit einem zusätzlichen Parameter erweitert. Die INRETS-Funktion ist im Standard als Zwei-Bereichs-Modell entsprechend den Formeln 5.5 und 5.6 formuliert:

$$f(q) = t_0 \cdot \frac{1,1 - \alpha \cdot \left(\frac{q}{\gamma \cdot q_{max}}\right)}{1,1 - \left(\frac{q}{\gamma \cdot q_{max}}\right)} \quad (5.5)$$

$$\text{für } \frac{q}{q_{max} \cdot \gamma} \leq 1$$

$$f(q) = t_0 \cdot \frac{1,1 - \alpha}{0,1} \cdot \left(\frac{q}{\gamma \cdot q_{max}} \right)^2 \quad (5.6)$$

$$\text{Für } \frac{q}{\gamma \cdot q_{max}} > 1$$

Parametrisiert man den Standardwert 1,1 in der INRETS-Funktion mit β , so lässt sich die Funktion hervorragend an die HBS-Daten, auch mit Lkw-Anteil, anpassen. Die neue Funktion für den Bereich bis zur Kapazitätsgrenze ist in Formel 5.9 beschrieben und die Funktion in Abbildung 5.6 dargestellt. Die ermittelten Funktionsparameter sind $\beta = 1,15$, $\alpha = 0,85$ und $\gamma = 1,05$.

$$f(q) = t_0 \cdot \frac{\beta - \alpha \cdot \left(\frac{q}{\gamma \cdot q_{max}} \right)}{\beta - \left(\frac{q}{\gamma \cdot q_{max}} \right)} \quad (5.7)$$

$$\text{für } \frac{q}{\gamma \cdot q_{max}} \leq 1$$

Für dem Bereich $\frac{q}{q_{max} \cdot \gamma} > 1$ wird folgende Lösung vorgeschlagen. Diese Lösung basiert auf der BPR3-Funktion und gibt einen linearen Funktionsverlauf für den Staubereich vor. Ein lineares Verhältnis im Überlastbereich zwischen abfließendem und auflaufendem Verkehr ist ein empirisch belegtes Verhalten [76].

$$f(q) = t_0 \cdot \frac{\beta - \alpha \cdot \left(\frac{q}{\gamma \cdot q_{max}} \right)}{\beta - \left(\frac{q}{\gamma \cdot q_{max}} \right)} + (q - q_{max}) \cdot \delta \quad (5.8)$$

$$\text{für } \frac{q}{q_{max} \cdot \gamma} > 1$$

In dieser neuen Zwei-Bereichs-CR-Funktion fehlt jedoch der Parameter, mit dem sich der Funktionsverlauf unter dem Einfluss von erhöhtem Lkw-Aufkommen modellieren lässt. Eine solche Funktion wird im nächsten Kapitel entwickelt und diskutiert.

5.2. CR-Funktion mit Lkw-Anteil

Die Berücksichtigung des Lkw-Anteils ist eine wesentliche Eigenschaft der CR-Funktion, so dass diese auch den CACC-Anteil integrieren kann. Um eine solche Funktion zu entwickeln,

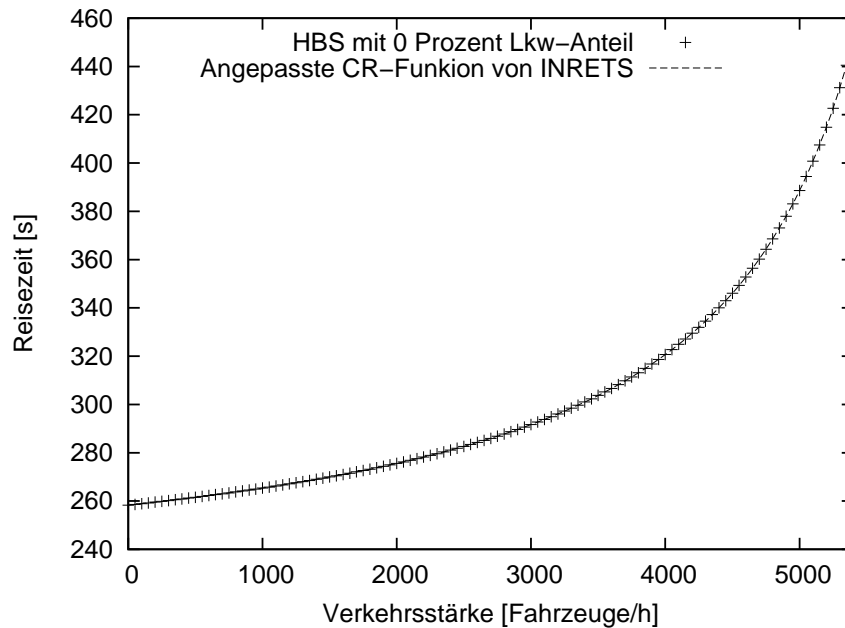


Abbildung 5.6.: INRETS-Funktionsverlauf bei HBS-Daten einer dreistreifigen BAB

wurden die Parameter der Funktion mit der Methode der kleinsten Quadrate an Daten des HBS, jeweils mit 10% und 20%, gesucht. Ebenso wie beim Funktionsverlauf ohne Lkw-Anteil, ließen sich die Funktion und die Daten hervorragend angleichen (siehe Abbildung 5.9). Nun kann man die jeweiligen Parameter in Abhängigkeit zum Lkw-Anteil setzen und damit eine mathematisch korrekte Funktion herleiten. Im Anhang C ist der Zusammenhang zwischen den Funktionsparametern und dem Lkw-Anteil grafisch dargestellt. Es sind für die Parameter α , β und γ jeweils lineare Funktionen, welche die Wirkung des ansteigendem Lkw-Anteils abbilden. Diese Funktionen lassen sich somit in die CR-Funktion anstatt der Parameter selbst schreiben. Die daraus resultierende CR-Funktion unter Einfluss des Lkw-Anteils ist in Formel 5.9 aufgeführt.

$$f(q) = t_0 \frac{(0,01195 \cdot T + 1,15832) + (-0,01978 \cdot T \cdot x + 0,83089) \cdot \left(\frac{q}{q_{max} \cdot (-0,01978 \cdot T + 1,04894)} \right)}{0,01195 \cdot T + 1,15832 - \left(\frac{q}{q_{max} \cdot (-0,01978 \cdot T + 1,04894)} \right)} \quad (5.9)$$

mit $T = \text{Lkw-Anteil}$, $T \text{ Element } [0;100]$

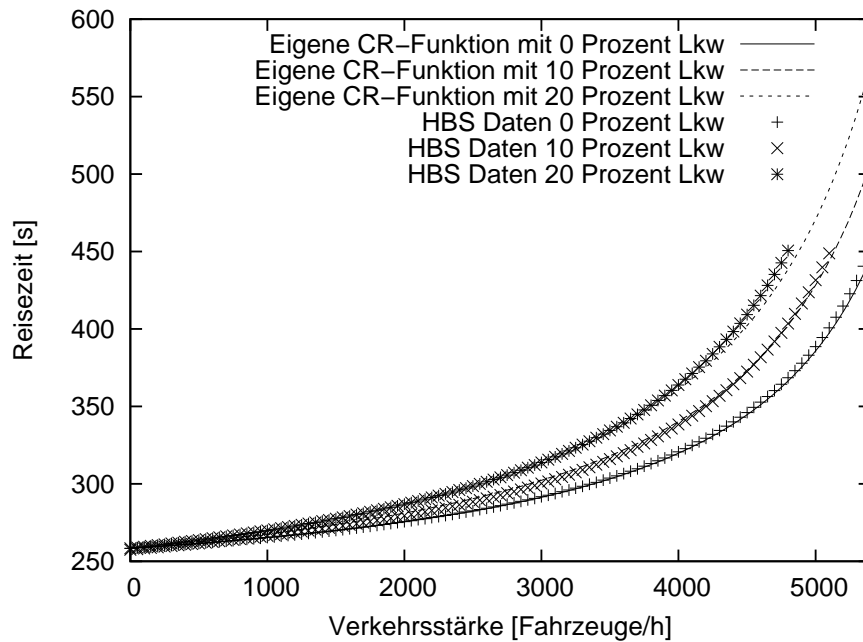


Abbildung 5.7.: CR-Funktionsverlauf bei HBS-Daten einer dreistreifigen BAB

Diese Funktion ist jedoch auf Grund der vielen Parameter und Terme sehr unhandlich für den Gebrauch in Angebotsmodellen. Deshalb wurde nach einer vereinfachten Lösung gesucht.

Als hinreichend genaues Ergebnis ist der Term $\alpha - \frac{T}{\tau}$ gefunden und in die Funktion integriert worden, wobei T dem Lkw-Anteil in Prozent (ein Wert zwischen 0 und 1) und τ einem freien Parameter entspricht. Es wurden nun die Parameter der Funktion für dreispurige und zweispurige Autobahnen, entsprechend den HBS-Daten [15], gesucht. Für die dreispurige Autobahn wurde der Wert $\tau = 2$ und für zweispurige Autobahnen der Wert $\tau = 4$ ermittelt. In den Abbildungen 5.7 und 5.8 sind die HBS-Daten mit unterschiedlichem Lkw-Anteil und die entsprechenden CR-Funktionsverläufe dargestellt. Die CR-Funktion mit Berücksichtigung des Einflusses von Lkw auf die Reisezeit lautet:

$$f(q) = t_0 \cdot \frac{\beta - \left(\alpha - \frac{T}{\tau}\right) \cdot \left(\frac{q}{\gamma \cdot q_{max}}\right)}{\beta - \left(\frac{q}{\gamma \cdot q_{max}}\right)} \quad (5.10)$$

für $\frac{q}{q_{max} \cdot \gamma} \leq 1$, mit T= Lkw-Anteil, τ , α , β und γ als freie Parameter.

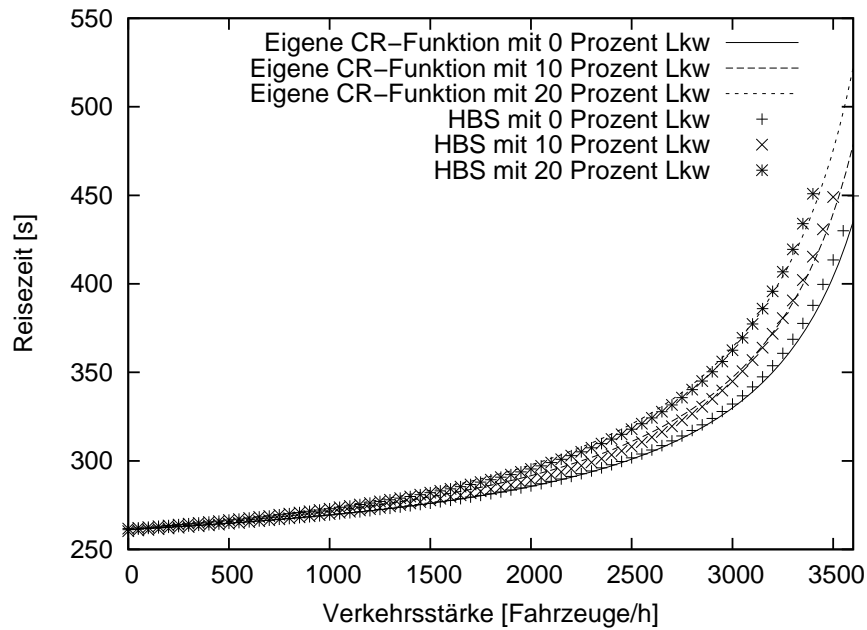


Abbildung 5.8.: CR-Funktionsverlauf bei HBS-Daten einer zweistreifigen BAB

Für den Bereich $\frac{q}{q_{max} \cdot \gamma} > 1$ ist die Lösung wie folgt:

$$f(q) = t_0 \cdot \frac{\beta - (\alpha - \frac{T}{\tau}) \cdot \left(\frac{q}{\gamma \cdot q_{max}}\right)}{\beta - \left(\frac{q}{\gamma \cdot q_{max}}\right)} + (q - q_{max}) \cdot \delta \quad (5.11)$$

Die entwickelte CR-Funktion wird den formalen Ansprüchen

1. Stetigkeit (Funktion ist an jeder Stelle definiert),
2. streng steigende Monotonie ($f(x_2) > f(x_1)$) und
3. Positivität ($f(x) \geq 0$)

gerecht (siehe Kapitel 5.1.3). Weiterhin entspricht sie bei einem Lkw-Anteil von 0 Prozent der um β erweiterten INRETS-Funktion und erst bei steigendem Lkw-Anteil beeinflusst der entwickelte Term $\alpha - \frac{T}{\tau}$ den Funktionsverlauf. Darüber hinaus ist die Gültigkeit des entwickelten Terms für zwei- und dreispurige Autobahnen nachgewiesen worden ¹.

Die Funktion gilt explizit für den Bereich $\frac{q}{q_{max}} \leq 1$, das bedeutet bis zur Kapazitätsgrenze. Darüber hinaus kann für die Verkehrsstärken $\frac{q}{q_{max}} > 1$ eine zweite Funktion in ihren

¹ Für Autobahnen mit mehr drei Fahrstreifen fehlen momentan standardisierte q-v-Beziehungen (siehe dazu [15])

Parametern frei vom Modellierer definiert werden. Dafür sind ebenfalls das Aufteilungsverfahren (z. B. Kirchhoff oder Box-Cox u. a.) und die Analyseperiode zu berücksichtigen. Auf beide Punkte soll hier nicht weiter eingegangen werden. Weiterhin ist zu betonen, dass dieser Funktion die Daten aus dem HBS [15] zu Grunde liegen und damit der dort dargestellte Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Lkw-Anteil als hinreichend genau übernommen wurde.

Nachdem eine Grundfunktion entwickelt wurde, welche die Reisezeit in Beziehung zur Anzahl von Pkw und Lkw setzt, muss nun ein Grundkonzept für die CR-Funktion mit CACC-Anteil formuliert werden. Dies geschieht im folgenden Kapitel.

5.3. Grundkonzept der CR-Funktion für die Wirkung von CACC

Die bekannten Wirkungen des Systems CACC betreffen sowohl die Reisezeit der Fahrzeuge als auch die Kapazität von Strecken (siehe Kapitel 2.6). Dem entsprechend kann erwartet werden, dass sich der Funktionsverlauf der CR-Funktion unter Einfluss von CACC ändert. Damit wäre es grundsätzlich richtig, alle Parameter (α , β und γ) in Abhängigkeit vom Anteil der mit CACC ausgestatteten Lkw zu setzen. Weil solche Konstrukte zwar mathematisch richtig, jedoch unhandlich sind, wird versucht, nur über die Parameter α die CACC-Wirkung abzubilden.² Durch eine geeignete Datenerhebung (siehe nächstes Kapitel) ist $f_\alpha(C_{CACC})$ aus den Daten abzuleiten. Somit lässt sich das Grundkonzept der CR-Funktion unter Berücksichtigung der CACC-ausgestatteten Lkw wie folgt formulieren:

$$f(q) = t_0 \cdot \frac{1,15 - (0,85 - \frac{T}{\tau} + f_\alpha(C_{CACC})) \cdot \left(\frac{q}{1,05 \cdot q_{max}}\right)}{1,15 - \left(\frac{q}{1,05 \cdot q_{max}}\right)} \quad (5.12)$$

Die Funktion kann nur für den Bereich $\frac{q}{q_{max} \cdot \gamma} \leq 1$ erstellt werden, da dies der makroskopisch modellierbare Bereich ist. Für die Modellierung des Überlastbereiches wurde ein Funktionskonzept vorgeschlagen (siehe Funktion 5.11), das im Einzelfall parametrisiert werden muss.

² Die Wahl fiel auf den Parameter α , da β den Graphen bei kleinen Änderungen lediglich parallel verschiebt und γ erst bei hohen Verkehrsstärken eine Wirkung auf den Graphen hat. Mit α hingegen lässt sich der Funktionsverlauf gut steuern.

6. Methode der Datenerhebung

Um in eine CR-Funktion die Effekte des Telematiksystems CACC zu integrieren, müssen Daten zu makroskopischen Kenngrößen des Verkehrsflusses q und v bzw. t vorliegen und ausgewertet werden. Derartige Daten sollten in Szenarien mit und ohne CACC erhoben worden sein. Die Effekte von CACC wären somit in einer CR-Funktion abbildbar, da sich unterschiedliche Parameter der Funktion ergeben würden.

Es sind derzeit keine Daten veröffentlicht, bei denen nur Lkw mit dem System CACC ausgestattet wurden und im Verband fahren. Demnach werden diese Daten für Aussagen zum Einfluss der Ausstattung von Lkw mit CACC auf die Reisegeschwindigkeit und Kapazität im Rahmen dieser Arbeit erstmals erhoben und publiziert.

Eine Felduntersuchung mit ausgestatteten und nicht-ausgestatteten Fahrzeugen ist eine Möglichkeit, die Daten zu erheben. Dies ist eine sehr aufwendige und kostenintensive Methode. Eine Alternative dazu besteht in der Simulation des realen Verkehrsablaufs. Die dafür notwendigen Werkzeuge sind vorhanden und in der Wissenschaft etabliert [66; 14]. Für die Datenerhebung im Rahmen dieser Untersuchung wird ein mikroskopisches Verkehrsmodell eingesetzt.

6.1. Aspekte des mikroskopischen Modells zur Datenerhebung

In den folgenden Kapiteln wird vertieft auf das mikroskopische Verkehrssimulations-Modell VISSIM eingegangen. Es werden die Methoden des Modells, der Versuchsaufbau für die Ermittlung von Effekten der CACC-ausgestatteten Lkw auf den Verkehrsablauf, der Kalibrierungsprozess und abschließend die Ergebnisse beschrieben und kritisch gewürdigt.

6.1.1. Auswahl des Modells

Es gibt eine Vielzahl von mikroskopischen Verkehrsflussmodellen (siehe beispielsweise [66; 32; 65; 73]). Für diese Untersuchung standen zwei Modelle zur Verfügung, zwischen denen gewählt werden konnte. Eines ist die vom „DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik“ entwickelte Open-Source-Software *SUMO* [24] und das andere die von der PTV AG kommerziell vertriebene Software *VISSIM* [88]. Zur Entscheidung für eines der beiden Modelle werden die für die Simulation von CACC wesentlichen Eigenschaften der Modelle verglichen. Das sind die implementierten Fahrzeugfolgemodelle, die Möglichkeit, Fahrzeuge in einem Verband zu koppeln sowie die Möglichkeit, verkehrstechnische Daten zu erheben.

Beide Programme, SUMO und VISSIM, wurden erfolgreich in Projekten eingesetzt und können realitätsnahe Ergebnisse erzeugen (siehe beispielsweise [24; 85]). Die jeweils implementierten Fahrzeugfolgemodelle unterscheiden sich im Detaillierungsgrad der Einstellungsmöglichkeiten. Mit den gegebenen einstellbaren Parametern kann jeweils die Imperfektion des konventionellen Fahrens, was einerseits durch CACC-System unterbunden wird, simuliert werden.

In VISSIM sind detaillierte Parameter, welche die Implementierung eines automatischen Fahrsystems zulassen, vorhanden. Die Vorteile von VISSIM liegen jedoch nicht in der einstellbaren Perfektion des Fahrers (das ginge bei SUMO ebenso), sondern bei der Imperfektion und der feinen Justierungsmöglichkeit des imperfekten Fahrverhaltens.

Während für SUMO alle Parameter und deren Wirkungsweisen offen gelegt sind (Open-Source-Prinzip), wirken in VISSIM interne, nicht beeinflussbare Parameter. Dieser Fakt stuft die wissenschaftliche Bewertungsmöglichkeit von VISSIM-Ergebnissen unter die von SUMO.

Die Möglichkeit, CACC-ausgestattete Fahrzeuge in einem Verband zu koppeln, ist in SUMO durch die exakt festlegbare Fahrzeugreihenfolge gegeben. Nachteilig ist jedoch, dass der CACC-geregelte Abstand nicht direkt eingestellt werden kann, sondern sich aus der Berechnung des Sicherheitsabstands ergibt. Über die Reaktionszeit, die ebenfalls in das Fahrzeugfolgeverhalten eingeht, wäre der Abstand jedoch steuerbar. In VISSIM ist die Fahrzeugfolge nicht direkt steuerbar, weil die Fahrzeuge nur zufällig ausgewählt die Strecke befahren.

In beiden Modellen können die zu einem Konvoi gekoppelten Fahrzeuge durch entsprechend lange Fahrzeuge als CACC-ausgestattete Fahrzeuge umgesetzt werden. Das perfekte Fahren

durch drei mit CACC-ausgestattete Fahrzeuge, z. B. mit 15 und 10 Metern Abstand, lassen sich valide durch ein Fahrzeug mit der Länge 65 Meter simulieren.

VISSIM und SUMO unterscheiden sich in der Möglichkeit der Einstellung des Lkw-Anteils. In SUMO kann ein Lkw-Anteil auf zwei Arten umgesetzt werden. Entweder müssen in SUMO die exakte Fahrzeugreihenfolge und darin eingebunden die entsprechenden Lkw definiert sein oder man nimmt eine Verteilung von Fahrzeugen an und einen wahrscheinlichen Anteil an Lkw (Parameter *Probability*). Der Parameter *Probability* wird in einer Binomialverteilung umgesetzt. Das bedeutet, dass man eine hinreichend große Anzahl an Simulationen durchführen muss, um valide Aussagen zu Wirkungen bei einem bestimmten Lkw-Anteil und Ausstattungsgrad zu erhalten. In VISSIM werden die verschiedenen Fahrzeugtypen poissonverteilt, entsprechend der Verkehrsstärke einer Zeitperiode umgesetzt. Die Zufälligkeit kann durch die Variation der Fahrzeugreihenfolge (Startzufallszahl und Vielfaches davon) simuliert werden.

Die Datenerhebung ist in beiden Modellen keine Restriktion. Es können mittlere Geschwindigkeiten, die Verkehrsstärken, auch differenziert nach Fahrzeugtyp erhoben und ausgelesen werden. Auch das Festlegen des Erhebungsquerschnitts sowie die Anzahl der Messstellen sind in beiden Modellen beliebig wählbar.

Vergleicht man die beschriebenen Eigenschaften der Modelle und stellt sie den Anforderungen einer Simulation des Verkehrsflusses unter Einfluss von CACC-ausgestatteten Fahrzeugen gegenüber, erfüllen beide Modelle die Voraussetzungen. Es wird VISSIM auf Grund der kontrollierteren Erhebungsbedingungen (Steigerung der Verkehrsstärke, des Lkw-Anteils und des Ausstattungsgrades, aktueller Entwicklungsstatus des Überholvorgangs im Modell) für die Datenerhebung gewählt.

6.1.2. Beschreibung des Fahrzeugfolgeverhaltens in VISSIM

Das Fahrzeugfolgemodell in VISSIM basiert auf den Arbeiten von WIEDEMANN. Es enthält ein psycho-physisches Modell, um die Längsbewegung der Fahrzeuge, Spurwechselvorgänge sowie das Verhalten innerhalb einer Fahrspur zu steuern. Im Folgenden wird das Verkehrsverhalten nach WIEDEMANN 99 [92] beschrieben, da dies durch seine Vielzahl an Parametern moderner ist als das Vorgängermodell WIEDEMANN74.

Das Modell für die Längsbewegung der Fahrzeuge WIEDEMANN 99 kann mit zehn Basisparametern angepasst werden, CC0 bis CC9. Die *Anzahl der Vorderfahrzeuge*, eine *maximale*

Vorausschauweite und die *vorübergehende Unaufmerksamkeit* sind zusätzlich einstellbare Parameter des Fahrverhaltens. Weiterhin gibt es VISSIM-interne Parameter, die auf das Verkehrsverhalten wirken, jedoch nicht extern steuerbar sind.

Wie gut der Fahrer eines Fahrzeugs das Fahrverhalten anderer Fahrzeuge voraussehen kann, wird durch die **Anzahl der Vorderfahrzeuge** bestimmt. Dies wird einmal durch die absolute Anzahl an Fahrzeugen, standardmäßig sind zwei Fahrzeuge voreingestellt, als auch durch einen Distanzbereich gesteuert. Letzterer ist mit 0 bis 250 Metern voreingestellt. Die **vorübergehende Unaufmerksamkeit** simuliert, dass Fahrer nicht immer aufmerksam im Straßenverkehr sind. Reaktionen können deshalb verzögert und das Fahrverhalten nicht-konstant sein. Dazu können in VISSIM die Zeitdauer und die Häufigkeit der Unaufmerksamkeit angegeben werden. In der Standardeinstellung sind beide Werte mit null ausgewiesen. Für die Simulation des Autobahnverkehrs sind als typische Werte in [34] 1 bis 3 Sekunden mit einer Wahrscheinlichkeit von 1 bis 5 Prozent genannt.

Der Parameter **CC0** definiert den durchschnittlichen Abstand zweier stehender Fahrzeuge. Es gibt keine Variationen des Wertes. CC0 beeinflusst die Kapazität einer Strecke, weil er genutzt wird, um den Sicherheitsabstand dx_{safe} zu berechnen (siehe Formel 6.1). Der in VISSIM voreingestellte Standardwert von CC0 ist 1,50 Meter.

$$dx_{safe} = CC0 + CC1 * speed \quad (6.1)$$

Der Faktor **CC1** ist der Zeitabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug. Mit steigender Geschwindigkeit erhöht sich durch CC1 der Wegabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug, was in Formel 6.1 deutlich wird. Der Standardwert ist 0,9 Sekunden. Erhöht man den Wert, erhöht sich der Sicherheitsabstand, was einen vorsichtigeren Fahrer unterstellt.

Die Längs-Oszillation des Abstandes wird durch **CC2** bestimmt. Dieser Parameter beschreibt, wieviel Abstand vom Fahrer zum Vordermann zugelassen wird, bevor er wieder aufschließt. Der Standardwert von 4 Metern führt zu einem stabilen Folgeverhalten.

Der Beginn des Verzögerungsvorgangs bis zum Erreichen des Sicherheitsabstandes wird durch den Parameter **CC3** festgelegt. Die Wunsch- und Maximalverzögerung beeinflusst in Kombination mit diesem Parameter, ab welchem Abstand zum langsameren Vorderfahrzeug der Verzögerungsvorgang eingeleitet wird. Der voreingestellte Wert für den Verzögerungsprozess beträgt 8 Sekunden.

Die Reaktionsempfindlichkeit auf Beschleunigung oder Verzögerung des Vordermannes wird durch die Parameter **CC4** und **CC5** beschrieben. CC4 bezieht sich auf negative

Geschwindigkeitsdifferenzen und CC5 auf positive. Je niedriger die Werte sind, desto sensibler reagiert der Fahrer oder anders ausgedrückt, die Fahrzeuge sind stärker aneinander gekoppelt. In [88] wird empfohlen, beide Parameter mit dem gleichen Wert anzusetzen. Die Standardwerte sind +/- 0,35.

CC6 steuert für die Folgefahrt den Einfluss des Abstandes auf die Oszillation der Geschwindigkeit. Der Parameter beschreibt damit den Umstand, dass mit zunehmendem Abstand die Oszillationen der Geschwindigkeit des führenden Fahrzeugs falsch eingeschätzt werden. Würde der Wert auf null gesetzt, kann der Fahrer des folgenden Fahrzeugs den Anstand immer gleich gut einschätzen. Je höher der Wert ist, desto schlechter werden die Geschwindigkeitsänderungen des führenden Fahrzeugs eingeschätzt. Der Standardwert hierfür ist 11,44.

Die Beschleunigung während der Oszillation wird durch den Parameter **CC7** bestimmt. $0,25 \frac{m}{s^2}$ ist der Standardwert von CC7.

Die Wunschbeschleunigung aus dem Stillstand wird dem Modell durch den Parameter **CC8** vorgegeben. Der Wert kann für die einzelnen Fahrzeuge nicht höher werden, als es das maximale Beschleunigungsvermögen des Fahrzeugs zulässt. Dieses wird für die jeweiligen Fahrzeuge in VISSIM mit Verteilungsfunktionen definiert. Der Standardwert für die Beschleunigung von Pkw ist $3,5 \frac{m}{s^2}$.

Für die Geschwindigkeit von $80 \frac{km}{h}$ und mehr setzt der Parameter **CC9** eine neue Wunschbeschleunigung fest. Damit wird die begrenzte Leistungsfähigkeit der Fahrzeuge widergespiegelt. Wie auch bei CC8 begrenzt das eingestellte Maximal-Beschleunigungsvermögen von Fahrzeugen die Umsetzung des Wertes in der Simulation. Standardmäßig sind $1,5 \frac{m}{s^2}$ in VISSIM voreingestellt.[88; 78]

Das Zusammenwirken der Parameter ist nicht vollständig in Formeln publiziert. Qualitativ stellt sich der Zusammenhang der vom Anwender einstellbaren Parameter wie folgt dar: Ein Fahrzeug kann sich in einem von vier Zuständen befinden: freies Fahren, Annäherung, Folgen und Bremsen [88].

Freies Fahren: Der Fahrer kann unbeeinflusst von vorausfahrenden Fahrzeugen seine Wunschgeschwindigkeit erreichen und halten. Diese ist wegen der Imperfektion des Fahrers nicht konstant, sondern oszilliert mit positiven und negativen Abweichungen. Das geschieht durch interne Parameter. Extern kann das Zulassen von vorübergehender Unaufmerksamkeit und deren Eintritts-Wahrscheinlichkeit die Oszillation erhöhen (siehe Abbildung 6.1).

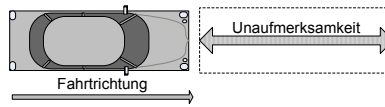


Abbildung 6.1.: VISSIM-Parameter für freies Fahren

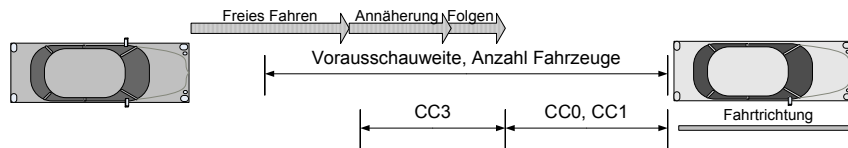


Abbildung 6.2.: VISSIM-Parameter bei der Annäherung

Annäherung: In diesem Zustand passt der Fahrer seine Geschwindigkeit an ein vorausfahrendes langsames Fahrzeug an. Idealtypisch wird so verzögert, dass mit Erreichen des Wunschabstands die Geschwindigkeitsdifferenz null ist.

Für die Annäherung besteht folgender Parameterzusammenhang: Der Grenzwert, bei dem ein Fahrzeug erkannt wird, kann in Metern und der Anzahl der Fahrzeuge festgelegt werden. Nachdem ein vorausfahrendes Fahrzeug vom Fahrer registriert wurde, kann mit dem Parameter CC3 bestimmt werden, wann der Verzögerungsvorgang eingeleitet wird, um den Folgeabstand CC1 zu erreichen. Je höher CC3 gesetzt wird, desto langsamer kann die Annäherung durchgeführt werden. Der Zustand *Folgen* wird mit Erreichen von CC1 eingeleitet. In Abbildung 6.2 ist der Parameterzusammenhang grafisch abgebildet.

Folgen: Bei der Folgefahrt wird der Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug gehalten. Es gibt dabei eine leichte Oszillation des Abstandes wegen der Imperfektion des Fahrers.

Die Folgefahrt wird durch folgende Parameter beschrieben: Der Folgeabstand wird in der Einheit Sekunden mit dem Wert CC1 eingestellt. In Kombination mit der aktuellen Geschwindigkeit des Fahrzeugs ergibt sich ein relativer Abstand in Metern zum Vordermann. CC1 ist der Minimalwert des Abstands, der vom Folgefahrzeug zum führenden Fahrzeug angenommen werden soll. Der Parameter CC2 bestimmt den Maximalwert, den das Fahrzeug zum führenden Fahrzeug zulassen soll. Im Bereich von CC2 oszilliert das Fahrzeug, weil der humane Fahrer imperfekt ist. Dieses Oszillieren wird durch die Parameter CC4, CC5 und CC6 beeinflusst. CC4 und CC5 bestimmen, ob der Fahrer sehr gut eine geänderte Geschwindigkeit des Vordermanns erkennt und entsprechend schnell reagiert oder nicht. Erweitert wird dies um den Unschärfeparameter CC6. Dieser kann die eingestellte

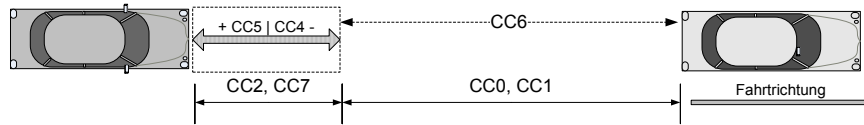


Abbildung 6.3.: VISSIM-Parameter bei der Folgefahrt

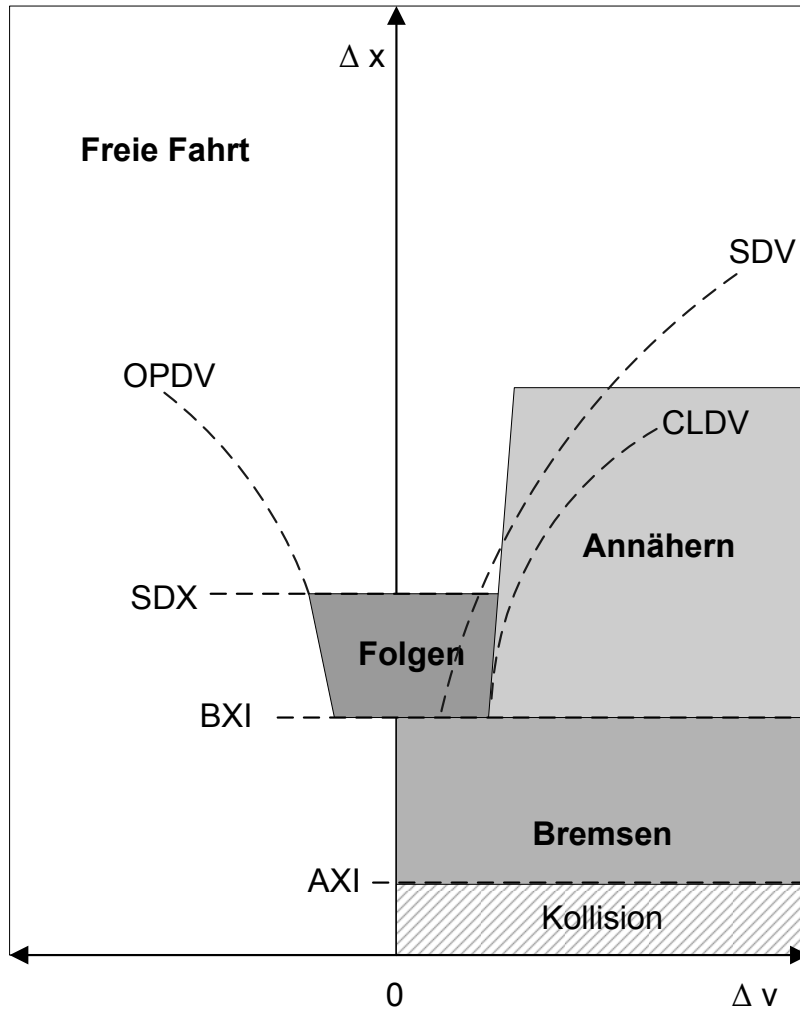
Reaktionsempfindlichkeit mit steigendem Abstand zum Vordermann beeinflussen. Dadurch wird das sinkende Einschätzungsvermögen eines Fahrers simuliert, die aktuelle Geschwindigkeitsänderung des Vordermannes trotz großer Distanzen korrekt zu erfassen. Bei schlechter Reaktionsfähigkeit wird dennoch eine Reaktion bei Erreichen von CC2 eingeleitet. Will man schlechte oder gute Reaktionen simulieren, müssen alle Werte korrespondierend gesetzt werden. Eine grafische Beschreibung des Parameterzusammenhangs einer Folgefahrt ist in Abbildung 6.3 dargestellt.

Bremsen: Wird der gewünschte Sicherheitsabstand unterschritten, so wird das Fahrzeug mit mittlerer bis starker negativer Beschleunigung abgebremst. Typische Situationen, die deutliches Verzögern des Fahrzeugs notwendig machen, sind spontanes Abbremsen des vorausfahrenden Fahrzeugs oder das Einscheren eines Fahrzeugs bei einem Fahrstreifenwechsel. Die dem Fahrzeug zugeordneten Wunsch- und Maximalverzögerungswerte bestimmen die Verzögerungsstärke.

Das psychophysische Fahrzeugfolgemodell ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Es zeigt die vier Zustände, in denen sich ein Fahrzeug befinden kann, und deren Zusammenhang bei der Modellierung der Längsbewegung von Fahrzeugen. Die Parameter sind, soweit veröffentlicht, im funktionalen Zusammenhang den Zuständen zugeordnet.

In einer Studie [77] wurde die Sensibilität der Parameter CC0-CC9 bezogen auf die maximale Verkehrsstärke q_{max} getestet. In Tabelle 6.1 sind die Abweichungen von q_{max} gegenüber den kalibrierten Parametern aufgeführt. Signifikanten Einfluss auf die Kapazität hat bei kleinen Parameteränderungen nur CC2. Er ist der sensibelste Parameter. CC0, CC1, CC4, CC5 und CC8 beeinflussen die Kapazität nur bei deutlichen Parameteränderungen gegenüber dem Standardwert. Bei den verbleibenden Parametern CC3, CC6, CC7 und CC9 ist die Wirkung vernachlässigbar klein. Im Versuch ist auch eine Fehlerquote ausgewiesen. Bei allen Parametern ist der Standardfehler relativ deutlich. Das weist auf eine hohe Anzahl von nötigen Versuchen hin, um ein valides Ergebnis zu erhalten.

Das Modell für den Spurwechsel unterscheidet zwei Arten des Spurwechsels. Das sind der notwendige Wechsel, beispielsweise wegen Abbiegevorgängen, und die freie Spurwahl.



AXI (Abstand stehender Fahrzeuge)	= $l_{n-1} + CC0$
BXI (Minimaler Wunschabstand)	= $AXI + (CC1 * v)$
SDX (Maximaler Wunschabstand)	= $BXI + CC2$
SDV (Grenzwert der Fz-Registrierung)	= $CC3 * (-\Delta v) + SDX + (CC3 * CC4)$
CLDV (Grenzwert für Annäherungsprozess)	= $-CC4$
OPDV (Grenzwert im Folgeprozess)	= $-CC5$

Abbildung 6.4.: Fahrzeugfolgmodell von Wiedemann
in Anlehnung an [92; 28]

Parameter Änderung	Standard	kalibriert	niedrig	medium	hoch
CC0	1,50	1,45	0,61	1,53	3,05
Δq_{max} in [%]	-	0,00	0,52	0,42	-2,89
CC1	0,90	0,85	0,50	1,00	1,50
Δq_{max} in [%]	-	0,00	0,67	-1,65	-14,99
CC2	4,00	4,00	1,53	3,05	6,10
Δq_{max} in [%]	-	0,00	1,23	1,15	-2,71
CC3	-8,00	-8,00	-4,00	-10,00	-15,00
Δq_{max} in [%]	-	0,00	-0,55	-0,50	0,12
CC4 und CC5	0,35	1,00	0,10	0,50	2,00
Δq_{max} in [%]	-	0,00	0,87	0,77	-5,80
CC6	11,44	11,44	2,00	8,00	20,00
Δq_{max} in [%]	-	0,00	-0,39	-0,96	0,16
CC7	0,25	0,25	0,15	0,31	0,46
Δq_{max} in [%]	-	0,00	0,19	-0,37	0,41
CC8	3,50	3,52	1,95	3,05	3,52
Δq_{max} in [%]	-	0,00	-4,76	-0,19	0,00
CC9	1,50	1,50	0,64	1,37	2,29
Δq_{max} in [%]	-	0,00	0,05	-0,22	0,17

Tabelle 6.1.: Wirkungen der VISSIM-Basisparameter auf die Kapazität einer Strecke in Anlehnung an [77]

Die Parameter für den notwendigen Spurwechsel sind die maximale und die akzeptable Verzögerung des Fahrzeugs und des Folgefahrzeugs auf der neuen Spur. Der freie Spurwechsel wird durch Einhaltung des gewünschten Sicherheitsabstands zum Folgefahrzeug auf der neuen Spur ermöglicht. Weitere Parameter für den Spurwechsel sind Folgende [88]:

- Wartezeit bis zur Diffusion: Sie gibt an, wie lange ein Fahrzeug auf eine Zeitlücke wartet, bevor es von VISSIM aus dem Netz genommen wird.
- Minimale Nettoweglücke vorn/hinten: Der Parameter beschreibt den Mindestabstand zwischen zwei Fahrzeugen nach einem Spurwechsel.
- Wechsel auf langsamere Spur bei freier Fahrt: Dieser Parameter bestimmt die Mindestzeitlücke zu einem Vordermann auf der rechten Fahrspur, bei der dann das Fahrzeug ebenfalls die rechte Fahrspur wählt. Wird die Zeitlücke unterschritten, bleibt das Fahrzeug links. Dieser Parameter wird nur bei der Auswahl *Rechtsfahrgebot* einstellbar. Auf Autobahnen gilt das Rechtsfahrgebot.
- Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand: Für Überholvorgänge kann der Sicherheitsabstand (siehe CC1) reduziert werden.
- Maximalverzögerung für kooperatives Bremsen: Der Parameter gibt an, um wie viel das eigene Fahrzeug maximal bremst, um einen Spurwechsler in die eigene Spur zu lassen.

Neben den Modellen für die Längsbewegung und den Spurwechsel gibt es in VISSIM auch ein Modell für die Querbewegung. Auf dieses Modell soll nicht weiter eingegangen werden, da es für den Autobahnverkehr, der in dieser Untersuchung simuliert werden soll, keine praktische Bedeutung besitzt. Das Querverhalten ermöglicht das Überholen in der eigenen Fahrspur und ist z. B. für den Stadtverkehr geeignet (Überholen eines Radfahrers).

Die Nachfrage wird in VISSIM mit einer Verkehrsstärke $\frac{Fz}{h}$ festgelegt. Dieser Verkehrsstärke wird eine Verkehrszusammensetzung zugeordnet, welche die relativen Anteile von Pkw, Lkw, Bus etc. beinhaltet. An einem Querschnitt werden die Fahrzeuge poissonverteilt auf die Strecke gelegt. Mit einer Pseudo-Zufallszahl kann die Reihenfolge der Fahrzeuge variiert werden. Eine Festlegung der Reihenfolge von Fahrzeugen ist jedoch nicht möglich. Ob alle Fahrzeuge der für den jeweiligen Zeitabschnitt definierten Verkehrsstärke auf das Netz gelegt werden können, hängt von den Geschwindigkeiten der Fahrzeuge und den Fahrzeugfolgeparametern ab [88].

In den folgenden Kapiteln wird der gesamte Untersuchungsaufbau in VISSIM beschrieben. Sie unterteilen sich in das Netzmodell, in die technische Beschreibung der Fahrzeuge, das Fahrzeugfolgemodell, die Kalibrierung sowie die Parameter des intelligenten Lkw und die Szenarienbeschreibung.

6.1.3. Basisdaten für die Modellierung des Autobahnverkehrs in VISSIM

In VISSIM werden die Eigenschaften der Strecke, der Fahrzeuge, der Verkehrssituation und des Fahrers benötigt, um den Verkehrsablauf zu simulieren.

Der Streckenverlauf, z. B. die Kurvigkeit, hat keinen Einfluss auf den Verkehr in VISSIM. Deshalb wurde die Strecke pragmatisch angelegt, so dass diese auch bei bestimmten Vergrößerungsfaktoren auf dem Bildschirm zu überschauen ist. Die Strecke ist 5000 Meter lang. Einfahrten, Ausfahrten, Baustellen, Rastanlagen und andere mögliche Elemente von Autobahnen sind nicht implementiert, weil der Einsatz von CACC vorrangig außerhalb dieser Einflüsse gesehen wird (vgl. Kapitel 2.5).

Die Neigung einer Strecke hat in der Realität Einfluss auf den Verkehrsfluss. Dieser Zusammenhang ist im *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS)* abgebildet [15]. In VISSIM kann eine Streckenneigung eingestellt werden, die das Fahrverhalten von Lkw beeinflusst. Bei der Simulation wird sich auf die häufigste in Deutschland vorkommende Streckenneigung von < 2 Prozent beschränkt und in den Szenarien auf die mittlere Neigung zwischen 0 und 2 Prozent auf 1 Prozent eingestellt (siehe dazu 6.1.7).

Der voraussichtlich wahrscheinlichste Einsatz des CACC-Systems ist jener auf dreispurigen Fahrbahnen von BAB, da bei jeder Einfahrt auf zweispurigen Autobahnen das System den Verband entkoppelt [55]. Als Versuchsstrecke wird deshalb in VISSIM ein Querschnitt mit drei Richtungsfahrbahnen implementiert. Der Querschnitt selbst muss in VISSIM nicht weiter spezifiziert werden, wenn das Querverhalten der Fahrzeuge als einflusslos unterstellt wird. Das ist auf Autobahnen realistisch und wird deshalb im Modell so behandelt.

Auf der Fahrbahn selbst sind Detektoren zu implementieren, welche das Verkehrsverhalten erfassen. Dies wurde an drei Stellen getan ($x = 1000$ m, $x = 3000$ m und $x = 4800$ m), um eine Unabhängigkeit des Messergebnisses vom Detektorstandort zu gewährleisten

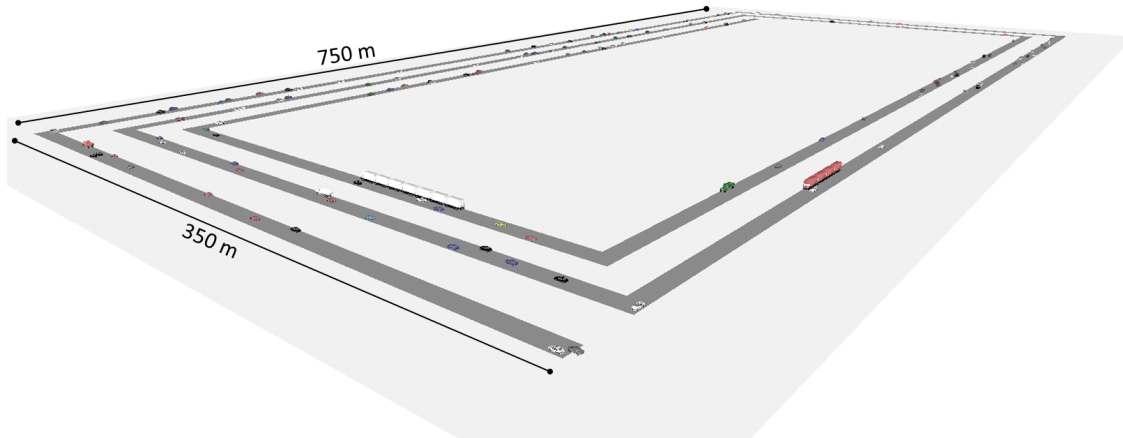


Abbildung 6.5.: Dreidimensionale Ansicht des simulierten Autobahnabschnitts

und gleichzeitig die Datenmenge pro Simulation zu erhöhen. Der Detektor erfasst die über 300 Sekunden gemittelte Geschwindigkeit der Pkw, um die mittlere momentane Geschwindigkeit \bar{v}_m zu ermitteln, und die Anzahl aller Fahrzeuge (Pkw und Lkw). Die im HBS ausgewiesenen idealtypischen q-v-Diagramme für verschiedene Streckentypen, Lkw-Anteile und Streckenneigungen, an denen das Modell kalibriert wird, beziehen sich auch auf die mittlere Geschwindigkeit von Pkw \bar{v}_m und die Anzahl von Pkw und Lkw [15]. Somit sind die erhobenen Daten aus dem Modell vergleichbar mit den Kalibrierungsdaten.

6.1.4. Eigenschaften der Fahrzeuge

Fahrzeuge werden in VISSIM in vier Ebenen beschrieben: Fahrzeugkategorie, Fahrzeugklasse, Fahrzeugtyp und Fahrzeugmodell. In Abbildung 6.6 sind diese vier Ebenen mit den für diese Untersuchung entscheidenden Eigenschaften dargestellt.

Die Fahrzeugkategorie hat Einfluss darauf, ob die Streckenneigung und das Masse-Motorleistungs-Verhältnis beim Fahrverhalten berücksichtigt wird oder nicht. Nur bei der Kategorie *Lkw* wirken diese, bei *Pkw* nicht.

Das Fahrverhalten von Fahrzeugen kann für definierte Fahrzeugklassen auf einer Strecke unterschieden werden. Ebenso können Daten nach den Fahrzeugklassen differenziert erhoben werden.

Innerhalb der Fahrzeugklassen werden Fahrzeugtypen zusammengefasst. Jeder Fahrzeugtyp

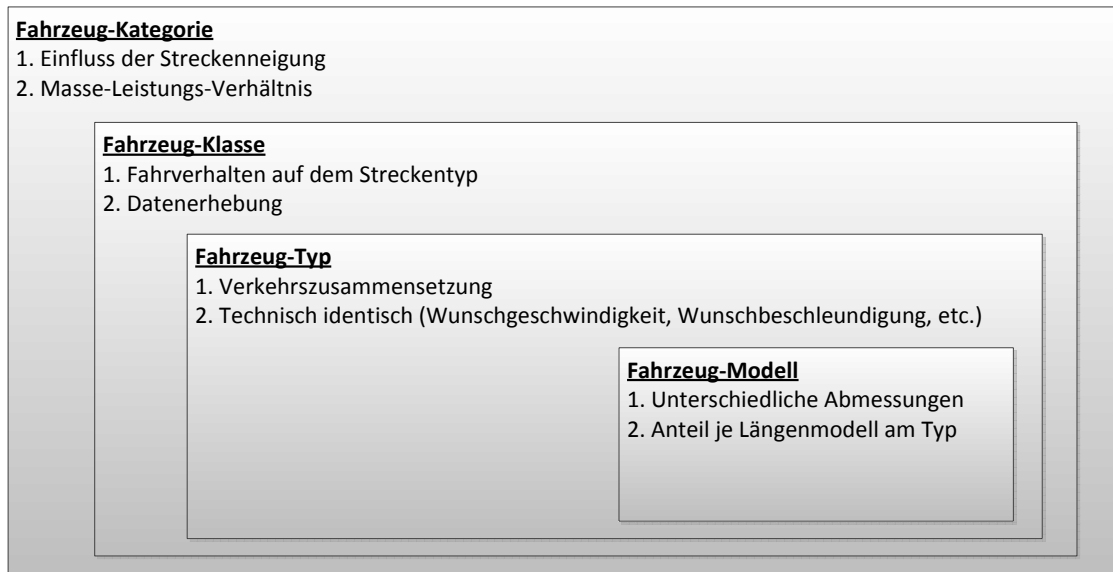


Abbildung 6.6.: Fahrzeugmodelle in VISSIM

hat gleiche technische Eigenschaften wie Wunschgeschwindigkeit, Wunschbeschleunigung, Wunschverzögerung etc. sowie deren Verteilungskurven. Die Fahrzeugtypen werden auch bei der Verkehrszusammensetzung genutzt, um die jeweiligen Anteile (z. B. Pkw und Lkw) am Zuflussquerschnitt zu definieren.

Innerhalb der Fahrzeugtypen können Fahrzeugmodelle definiert werden. Sie dienen dazu, unterschiedliche Fahrzeuglängen und deren Anteile an der Flotte zu bestimmen. Für den 3D-Modus können den Fahrzeugmodellen auch *reale* Fahrzeuge, z. B. Euro4-Lkw, zugeordnet und im Verkehrsablauf veranschaulicht werden.

Im Folgenden wird beschrieben, wie die Daten zur Beschreibung der Fahrzeuge aus vorhandenen Datenquellen generiert wurden.

Für die Erhebung werden drei unterschiedliche Fahrzeugklassen in VISSIM eingesetzt: Pkw, Lkw bzw. Sattelzugmaschinen und Gliederzüge. Entscheidend für die Bildung der drei Klassen, insbesondere bei den Lkw, waren die Fahrzeuglängen.

Zur Ermittlung der Fahrzeuglängen wurde eine Querschnittsmessung auf der DLR-Teststrecke am Ernst-Ruska-Ufer (Berlin, Adlershof) ausgewertet. Mittels Doppelinduktionsschleifen konnten dort die Anzahl der Fahrzeuge, nach TLS-Klassifizierungsgruppen (8+1-fein) geordnet ¹ [3] und die Fahrzeuglängen erfasst werden. Gemessen wurde vom

¹ TLS ist die Abkürzung für das Regelwerk Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen. Die

Klassennummer	Pkw Länge [m]	Pkw Anteil [%]	absolute Häufigkeit	Lkw Länge [m]	Lkw Anteil [%]	absolute Häufigkeit
1	2,4	2,7	992	5,4	0,0	0
2	3,4	7,0	2579	6,4	15,2	524
3	3,7	16,7	6145	7,4	12,5	429
4	4	28,4	10413	8,4	13,5	453
5	4,3	25,9	9507	10,4	14,1	486
6	4,6	9,1	3339	14,4	16,4	564
7	4,9	3,8	1400	15,4	9,8	337
8	5,2	2,2	806	16,4	11,1	381
9	7	3,2	1168	17,4	4,8	165
10	14,5	1,0	362	18,4	2,9	99

Tabelle 6.2.: Fahrzeuglängen und -anteile nach Pkw und Lkw

20.05. bis zum 22.05.2008 jeweils 24 Stunden. Die Teststrecke ist eingebunden in das öffentliche Straßennetz (mit der zulässigen Geschwindigkeit von $50 \frac{Km}{h}$ und mit jeweils zwei Richtungsfahrbahnen). Sie war zum Zeitpunkt der Erhebung die Umleitung der BAB 113, welche sich noch im Bauzustand befand. Auf Grund der Lage und der Belastungssituation während der Zeit als Umleitung-Strecke kann davon ausgegangen werden, dass der Stadtverkehr einen sehr geringen Anteil an den gemessenen Fahrzeugen hatte. Es resultierten 40 149 Einzeldaten aus der Messung, welche als eine ausreichend große Stichprobe für die Auswertung von Fahrzeugen und deren Längen auf Bundesautobahnen genutzt werden kann.

Es wurden nun die in der Erhebung gemessenen Fahrzeuglängen aus der 8+1-feinen Fahrzeugklassengruppe der Klassengruppe 2 (Pkw-ähnlich, Lkw-ähnlich) zugeordnet und nach jeweils zehn eigenen Längenklassen ausgewertet. Im Ergebnis sind jeder Klassengruppe zehn Fahrzeugtypen mit spezifischen Längen und Anteilen zugeordnet (siehe Tabelle 6.2). Anschließend wurden die Lkw unterteilt in die (kleinen) Lkw als eine Lkw-Gruppe und die Sattel- und Gliederzüge als zweite Lkw-Gruppe. Damit ergeben sich die in VISSIM implementierten drei Fahrzeugmodelle, wie sie in Tabelle 6.3 dargestellt sind.

Weil die Messstelle am Ernst-Ruska-Ufer in unmittelbarer Nähe des urbanen Raumes Berlin liegt, müsste untersucht werden, ob die Verteilung von kleinen und großen Lkw die

Erhebung in 8+1 Klassen bedeutet, dass 8 verschiedene Fahrzeugtypen auf Grund der Fahrzeuglänge in Lkw, Pkw, Sattelzug etc. eingeteilt werden und eine Klasse für nicht referenzierbare Fahrzeuge verbleibt.

Modell- nummer	Pkw		Lkw		Sattelzugm.	
	Länge [m]	Anteil [%]	Länge [m]	Anteil [%]	Länge [m]	Anteil [%]
1	2,4	2,7	6,4	21,3	15,4	34,3
2	3,4	7,0	7,4	17,5	16,4	38,8
3	3,7	16,7	8,4	18,4	17,4	16,8
4	4	28,4	10,4	19,8	18,7	10,1
5	4,3	25,9	14,4	23,0		
6	4,6	9,1				
7	4,9	3,8				
8	5,2	2,2				
9	7	3,2				
10	14,5	1,0				

Tabelle 6.3.: Fahrzeuglängen der VISSIM-Fahrzeugmodelle

realen Gegebenheiten auf Autobahnen mit der Funktion zur Abwicklung des Fernverkehrs widerspiegelt. Um dazu eine Aussage zu erhalten, wurden Daten von den Dauerzählstellen des Bundes ausgewertet [4]. Es konnten 421 Zählstellen an Autobahnen ausgewertet werden, an denen die gezählten Fahrzeuge nach TLS 8+1-Klassen dokumentiert sind. Es zeigt sich, dass der Anteil von Lkw mit Anhängern und Sattelzugmaschinen den Schwerverkehrsanteil prägen, im Gegensatz zu den kleinen Lkw und Lkw ohne Anhänger. Im Durchschnitt haben Lkw mit Anhänger und Sattelzugmaschinen einen Anteil von 81,9 Prozent an allen Lkw. In Abbildung 6.7 sind die Schwerverkehrsanteile und die Anteile der Fernverkehrs-Lkw aufgeführt.² Die Verkehrszusammensetzung im Modell kann deshalb nicht aus den Daten vom Ernst-Ruska-Ufer generiert, sondern muss aus Daten der Dauerzählstellen ermittelt werden.

Ein weiterer Parameter der Lkw im Modell betrifft deren Masse und Leistung. Hat die Strecke eine Neigung, wirken diese beiden Parameter in Form des Masse-Leistungsverhältnisses auf die Fahreigenschaften der Lkw. In der Simulation werden ein Leistungswert und eine Fahrzeugmasse zufällig ausgewählt. Daraus wird die spezifische Leistung in $[\frac{kW}{t}]$ gebildet. VISSIM-interne Grenzen der spezifischen Leistung sind $7 [\frac{kW}{t}]$ im Minimum und $30 [\frac{kW}{t}]$ im Maximum. Damit soll eine unrealistische Kombination der jeweils zufällig gewählten Masse und Leistung verhindert werden. Die spezifische Leistung beeinflusst das Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten der Fahrzeuge. Für andere Fahrzeugtypen außer für Lkw wird

² Bei Erhebungen durch die Dauerzählstellen des Bundes werden alle den Messquerschnitt passierenden Lkw dem Schwerverkehr zugeordnet. Fahrzeuge werden auf Basis der detektierten Fahrzeuglänge klassifiziert.

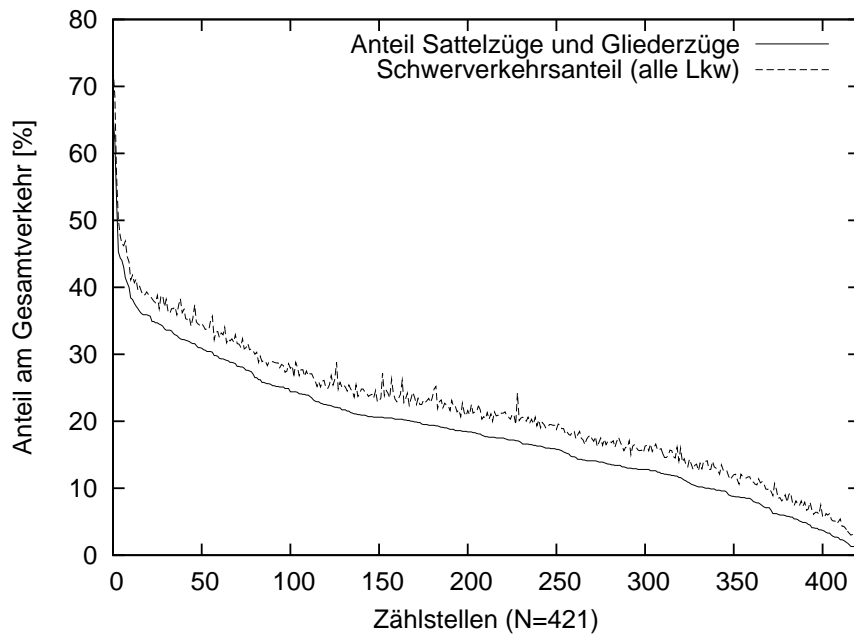


Abbildung 6.7.: Lkw-Anteil sowie der Anteil von Sattelzugmaschinen und Lkw über 12 t zGG auf Bundesstraßen in Anlehnung an [4]

keine spezifische Leistung gebildet. Umgesetzt wird das Masse-Leistungsverhältnis in VISSIM durch die Eingabe der Verteilung der Leistungswerte [kW] und der Massen [Kg], jeweils als Dichtefunktion zwischen dem Minimum und Maximum [88].

Für die Verteilung der Masse und der Leistung der Lkw wurde die KiD 2002 (Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland) [117] ausgewertet. Die in der KiD ausgewiesenen Fahrzeuge (Lkw über 3,5 Tonnen Nutzlast, Sattelzugmaschinen und Reisebusse) sind dem Schwerverkehr zugeordnet. Diese deutschlandweite Erhebung von Fahrten hat neben Daten zur Fahrt auch Daten zum Fahrzeug, mit dem die Fahrt durchgeführt wurde, dokumentiert. Für die Ermittlung der Massenverteilung wurden die Angaben K12 (Leergewicht des Fahrzeugs) und F12 (Gewicht der Ladung) addiert, um das Gewicht des Fahrzeugs während der Fahrt zu erhalten. Es wurden nur Werte bei der Auswertung berücksichtigt, die in Summe (K12+F12) im Bereich von 1 000 bis 40 000 Kilogramm waren. Die Verteilung von 4 559 Angaben ist in Abbildung 6.8 für alle in VISSIM implementierten Lkw-Fahrzeugmodelle dargestellt.

Die Angabe K06 in der KiD gibt die Leistung der Fahrzeuge aus. Dieser Wert wurde

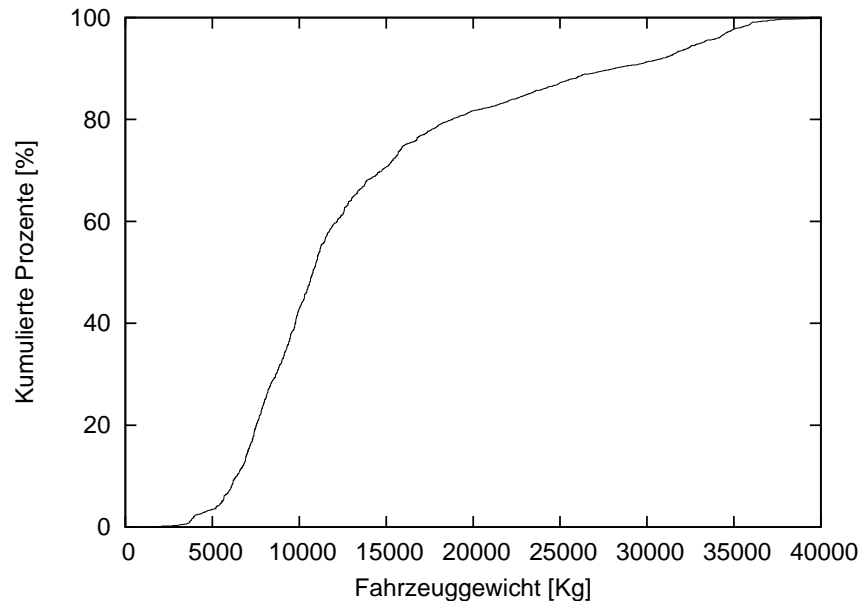


Abbildung 6.8.: Dichtefunktion des Gewichts von Fahrzeugen über 3,5 Tonnen Nutzlast

genutzt, um analog zur Auswertung der Fahrzeugmasse die Dichtefunktion der Fahrzeugleistung im Schwerverkehr zu ermitteln. Es konnten 4 999 gültige Fälle ausgewertet werden, deren Dichtefunktion in der Abbildung für alle in VISSIM implementierte Lkw-Fahrzeugmodelle 6.9 dargestellt ist.

Um die Verkehrssituation der *freien Fahrt* bis zum *gestauten Zustand* während der Simulation zu erzwingen, wurde die Verkehrsstärke sukzessiv gesteigert. Alle 300 Sekunden wurde, beginnend bei der Verkehrsstärke von $200 \frac{\text{Fahrzeugen}}{h}$, um weitere 200 erhöht bis zum Wert von $6\,000 \frac{\text{Fahrzeugen}}{h}$. Der Lkw-Anteil in der Verkehrszusammensetzung wird mit einem exakten Anteil festgelegt. Für alle Fahrzeuge gilt das Rechtsfahrgebot, wodurch das Wechseln der Fahrzeuge auf die rechte Fahrspur nach Überholvorgängen eingefordert wird. Weiterhin wurde für Lkw ein Fahrverbot auf der linken Fahrspur eingerichtet, so dass nur auf den beiden rechten Fahrspuren überholt werden kann.

6.1.5. Kalibrierung des Modells

Zur Beschreibung eines kalibrierten Zielzustandes des Modells wurden idealtypische q-v-Diagramme aus dem HBS [15], für dreispurige Autobahnen außerhalb von Ballungsräumen mit Lkw-Anteilen von 0 bis 20 Prozent gewählt. Die Kurven erlauben somit die Kalibrierung

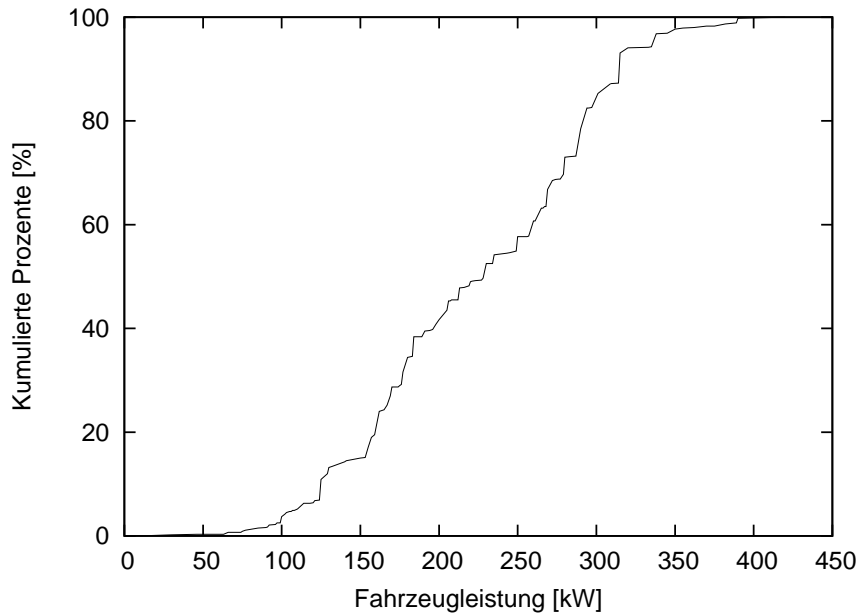


Abbildung 6.9.: Dichtefunktion der Leistung von Fahrzeugen über 3,5 Tonnen Nutzlast

eines Zustands ohne und mit Lkw. Die Verkehrszusammensetzung wird mit den drei Fahrzeugmodellen (Pkw, kleine Lkw bzw. Sattelzugmaschinen und Gliederzüge) so umgesetzt, dass der Lkw-Anteil an einem Querschnitt zu 81,9 Prozent aus Sattelzügen und Gliederzügen und zu 18,1 Prozent aus kleinen Lkw besteht (siehe Kapitel 6.1.4).

In Tabelle 6.1 wurden bereits für amerikanische Autobahnen kalibrierte VISSIM-Parameter aufgeführt (siehe Kapitel 6.1.2). Für Aussagen zum Einfluss der Parameter CC0 bis CC9 auf die Kapazität sind diese Parameter jeweils zwischen Minimal- und Maximalwerten variiert worden [77]. Somit sind sinnvolle Grenzen der Parameter beschrieben. Innerhalb dieser Grenzen wurden die Parameter für einen kalibrierten Zustand des Modells in dieser Arbeit gefunden. Die Einstellung der Unaufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer sind an den Kalibrierungshinweise aus [34] für den Autobahnverkehr orientiert.

Als erster Arbeitsschritt wurde der reine Pkw-Verkehr kalibriert. Anschließend wurden ein Lkw-Anteil von 20 Prozent in die Strecke eingespeist und die Parameter von den Lkw für eine Streckenneigung von 1 Prozent als mittlerer Neigung zwischen der im HBS ausgewiesenen Klasse von 0 bis 2 Prozent kalibriert. Im HBS wird auch die q-v-Beziehung bei einem Lkw-Anteil von 10 Prozent ausgewiesen. Als letzter Kalibrierungsschritt wurden die zuvor ermittelten Parameter auch für diesen

Lkw-Anteil eingesetzt, wobei sich, bei validen Parametern aus der Simulation mit 20 Prozent Lkw-Anteil eine Übereinstimmung zwischen HBS- und VISSIM-Daten ergeben sollte und dies auch ergab.

Das Bestimmtheitsmaß der VISSIM- und HBS-Daten wurde berechnet, um eine Aussage zur Güte des kalibrierten Ergebnisses zu erhalten. Dazu wurden die VISSIM-Daten nach Lkw-Anteil aus der Datenbank ausgelesen, wobei Übergangsbereiche des Lkw-Anteils von +/- 2 Prozent eingeräumt wurden. Für 10 Prozent Lkw-Anteil wurden die Daten mit 8, 9, 10, 11, 12 [%] und für 20 Prozent Lkw-Anteil mit 18, 19, 20, 21, 22 [%] als ein Datensatz erstellt. Anschließend wurden die Funktionen an eine Polynomfunktion vierten Grades gefittet, indem für beide Datensätze jeweils die Parameter einer Polynomfunktion vierten Grades bestimmt und anschließend die Funktionswerte beider Funktionen gegenübergestellt wurden. Der Korrelationskoeffizient, der aussagt, wie gut die VISSIM-Daten zur Polynomfunktion passen, ist für 0 Prozent Lkw-Anteil 0,97, für 10 Prozent Lkw-Anteil 0,98 und 0,99 für 20 Prozent Lkw-Anteil. Die Funktion passt demnach sehr gut zu den Daten. Für die HBS-Daten wurden ebenfalls die Parameter einer Polynomfunktion vierten Grades ermittelt, wobei hier der Korrelationskoeffizient $R^2 = 1$ ist. Anschließend konnte für die Funktionswerte beider Funktionen ein Bestimmtheitsmaß berechnet werden. Die Bestimmtheitsmaße bei unterschiedlichen Lkw-Anteilen waren jeweils 0,99 und unterschieden sich lediglich in der dritten Nachkommastelle. Mathematisch sind die kalibrierten Werte sehr gut.

Das Ergebnis der Kalibrierung ist in Abbildung 6.10 visualisiert. In den ersten drei Grafiken sind jeweils die Verkehrsstärke und die Verkehrsdichte aus VISSIM und dem HBS abgetragen. Unterschieden wurde nach dem Lkw-Anteil in den Stufen 0, 10 und 20 Prozent. Für diese Lkw-Anteile sind in der vierten Grafik die q-k-Daten aus VISSIM abgebildet. Weitere Grafiken zu den Kalibrierungsergebnissen sind im Anhang B hinterlegt.

Die im Kalibrierungsprozess ermittelten VISSIM-Parameter des Fahrzeugfolgmodells für jeweils Pkw und Lkw auf Autobahnen mit dreispurigen Richtungsfahrbahnen sind in Tabelle 6.4 aufgeführt. Weiterhin wurden die Verteilungskurven für die Wunschgeschwindigkeit, die Wunschverzögerung, die Maximalverzögerung, die Wunschbeschleunigung und die Maximalbeschleunigung in VISSIM angepasst (siehe Anhang A). Alle in VISSIM enthaltenen weiteren, aber hier nicht gezeigten Parameter sind in der Standard-Einstellung belassen. Die visuelle Übereinstimmung der Diagramme, die statischen Tests und die hohe

Parametername	Abkürzung	Pkw	Lkw
Stillstandabstand	CC0	0,61	1,45
Folgeabstand	CC1	1,09	1,66
Längs-Oszillation	CC2	3,05	1,50
Wahrnehmungsschwelle	CC3	-4,00	-3,50
neg. V-Differenz	CC4	-1,00	-1,00
pos. V-Differenz	CC5	1,00	1,00
Einfluss v auf Oszillation	CC6	20,00	20,00
Beschleunigung Oszillation	CC7	0,25	0,25
Beschleunigung bei v = 0 Km/h	CC8	3,52	1,05
Beschleunigung bei v = 80 Km/h	CC9	1,50	0,8
Vorausschauweite	-	250,00	250,00
Unaufmerksamkeits-Dauer	-	3,00	2,00
Unaufmerksamkeits-p	-	7,00	5,5
Sicherheitsabstandsfaktor bei Überholvorgängen	-	0,4	0,6

Tabelle 6.4.: VISSIM-Verhaltensparameter von Pkw und Lkw auf einer dreispurigen Autobahn

resultierende Validität bei 10 Prozent Lkw-Anteil lassen die Aussage zu, dass das Modell VISSIM sehr gut auf das HBS kalibriert ist.

6.1.6. Parameter des intelligenten Lkw

In Kapitel 2.5 wurde das Telematiksystem CACC organisatorisch und technisch in der Tiefe beschrieben, das in VISSIM implementiert werden kann.

Wird das erste Fahrzeug manuell gefahren, stimmen die Verhaltensparameter des ersten Fahrzeugs mit denen im Kalibrierungsprozess eingestellten für humane Fahrer überein. Zudem folgen die gekoppelten Fahrzeuge in einem Abstand von 10 Metern vollautomatisch. Weil in VISSIM die Fahrzeugreihenfolge nicht explizit definiert werden kann, sondern zufällig auf die Strecke gelegt werden, sind die Fahrzeugverbände somit nicht durch Einzelfahrzeuge abzubilden. Jedoch können gekoppelte Fahrzeuge als ein überlanges Einzelfahrzeug modelliert werden, ohne dass dies zu negativen Auswirkungen auf das Fahrzeugfolgeverhalten in VISSIM führen würde. Alle Fahrzeuge im Verband verhalten sich wie das erste. Gekoppelte Fahrzeuge werden deshalb mit den manuellen Verhaltensparametern und der Länge nach Gleichung 6.2 modelliert.

Die Verbandsbildung erfolgt modellextern. Nach [97] können maximal sieben Fahrzeuge aneinander gekoppelt werden. Der Abstand zwischen den Fahrzeugen beträgt jeweils 10 Meter

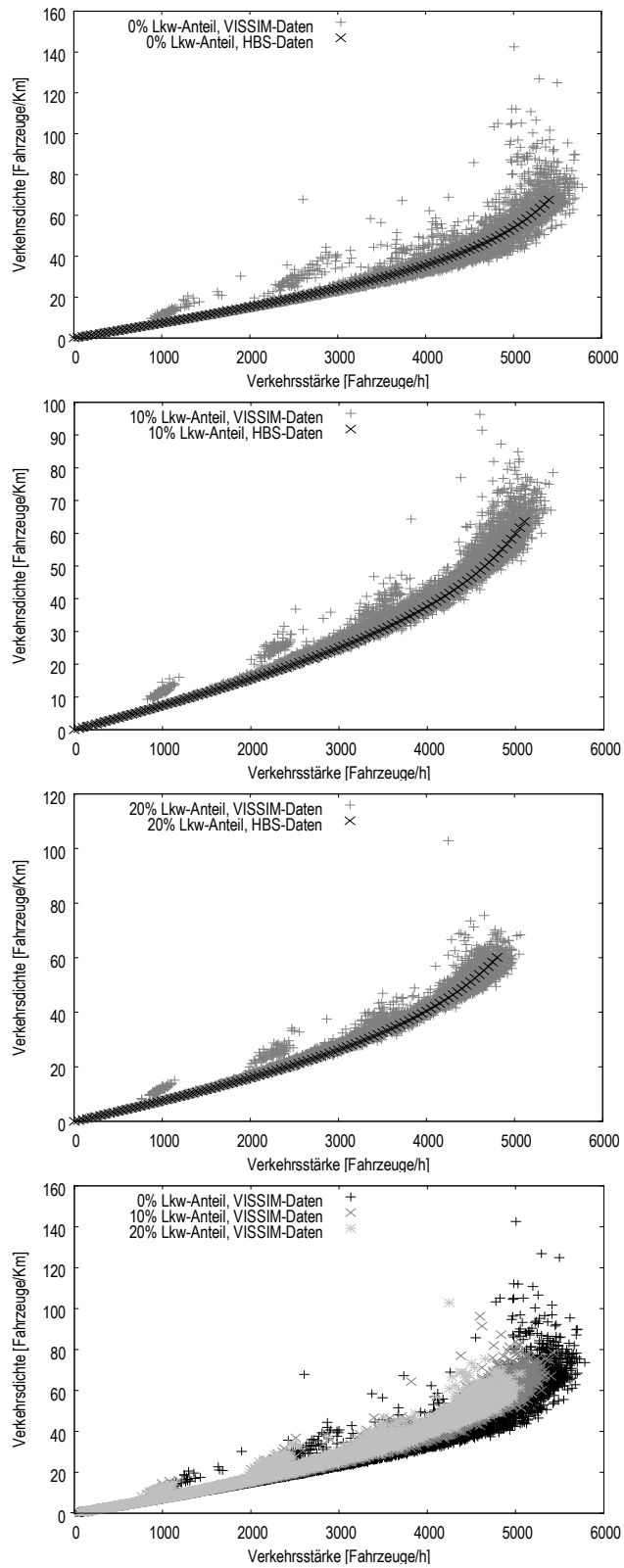


Abbildung 6.10.: Verkehrsstärke-Dichte-Diagramme der VISSIM- und HBS-Daten

[55]. Weil zur Konvoibildung das Massen-Leistungsverhältnis des mit CACC ausgestatteten Fahrzeugs geprüft wird, können theoretisch alle Lkw dann miteinander gekoppelt werden, wenn das Massen-Leistungsverhältnis der Fahrzeuge zueinander passend bzw. ähnlich ist. Welche Fahrzeuge sich in einem Verband koppeln, ist demnach zufällig. Auch die Anzahl der Fahrzeuge, die aneinander gekoppelt einen Verband bilden, ist zufällig. Man kann die Zufälligkeit mit der Annahme etwas einschränken, dass das CACC-System im absehbaren Szenario für das Fahren im Fernverkehr ausgelegt ist. Dem folgend, würde das System auch bei Fahrzeugen eingesetzt werden, die vorrangig im Fernverkehr eingesetzt werden. Das sind die in VISSIM bereits als dritte Fahrzeugklasse implementierten Sattelzugmaschinen und Gliederzüge.

Mit dieser Annahme werden in der Modellierung nur die Sattelzugmaschinen und Gliederzüge ($> 14,5$ m) in Konvois gekoppelt.

Für die Implementierung von CACC in VISSIM muss auch die Frage der wahrscheinlichen Anzahl von Fahrzeugen in einem Verband beantwortet werden. Die für die Praxis wahrscheinlichste Variante des CACC-Einsatzes ist laut [55] der *fahrerorganisierte Konvoi*. Das bedeutet, dass das CACC-System in einem bestimmten Radius nach geeigneten Fahrzeugen sucht und mit diesen einen Verband bildet. Auch die Verabredung auf Rastplätzen zur Verbandsbildung scheint realistisch. Dass geeignete Fahrzeuge gefunden werden, ist, so kann unterstellt werden, auch abhängig vom Durchsetzungsgrad des Systems. Weil aber auch während der Fahrt eines Verbandes weitere Fahrzeuge gekoppelt werden können und die Kopplung von zwei Verbänden (mit z. B. zwei plus drei Fahrzeugen) möglich ist, sind auch Fahrzeugverbände mit höheren Fahrzeugzahlen nicht auszuschließen. In diesem Sinne sind alle Varianten gleich wahrscheinlich ($p = \frac{1}{6}$), wenn keine näheren Informationen zur Verbandsbildung (in der Realität) vorliegen. Multipliziert man die Wahrscheinlichkeit einer Verbandslänge mit der Wahrscheinlichkeit der Fahrzeuganzahl, so erhält man die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Verbände (siehe Abbildung 6.11).

Nimmt man die Fahrzeuglängen aus Tabelle 6.3, so kann man die Längen der einzelnen Verbände entsprechend der Einzelfahrzeuglängen und der Fahrzeuganzahl nach Gleichung 6.2 bestimmen. Es ergeben sich 24 verschiedene Verbandslängen, die mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit auftreten, aber die Möglichkeiten zwischen minimalster und maximalster Länge repräsentieren (siehe Abbildung 6.11).

$$L_{CACC-Lkw} = dx \cdot (n - 1) + n \cdot L_{Lkw} \quad (6.2)$$

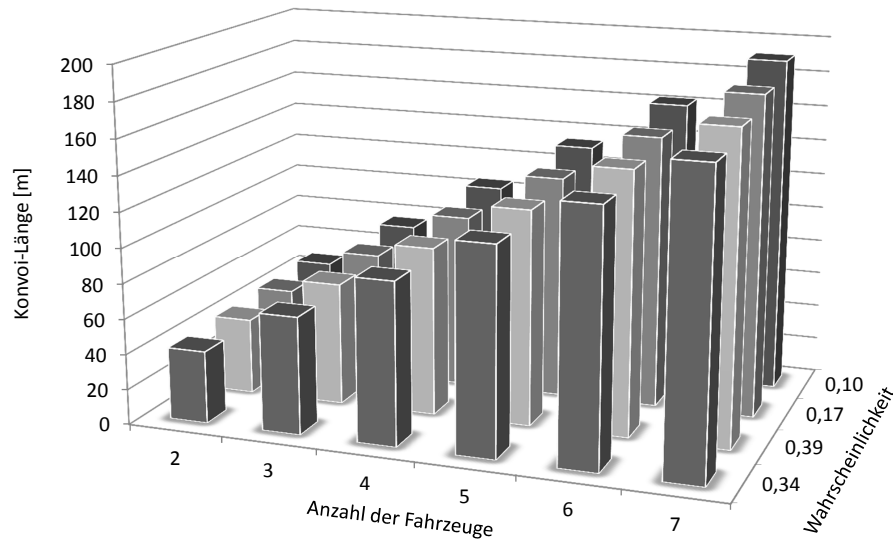


Abbildung 6.11.: Länge und Wahrscheinlichkeit der Verbände

mit L_{Lkw} = Länge des Einzel-Lkw, dx = Abstand zwischen den Lkw und n der Anzahl der Lkw im Verband

6.1.7. Definition der Simulationsszenarien

Das Ziel der Datenerhebung ist das Bereitstellen von Daten für die Ermittlung von funktionalen Zusammenhängen zwischen dem Ausstattungsgrad der schweren Lkw mit CACC und dem resultierenden Einfluss auf die Reisezeit sowie Kapazität in der CR-Funktion. Dazu muss ein Bereich für den CACC-Ausstattungsgrad und den Lkw-Anteil identifiziert werden, für den die Daten ermittelt werden. Der CACC-Ausstattungsgrad soll hier im Bereich von 0 bis 50 Prozent liegen. Bei höheren Ausstattungsgraden würde ggf. auch separate CACC-Spuren als wirtschaftlichere Variante in Betracht kommen (siehe [111; 1]). Für den Lkw-Anteil wird ein Bereich von 0 bis 25 Prozent gewählt. Damit werden sehr niedrige, aber auch schon deutlich belastende Lkw-Anteile in den Szenarien repräsentiert (siehe Abbildung 6.12). Extrema von sehr hohen Ausstattungsgraden und sehr hohen Lkw-Anteilen sind nicht Teil der Szenarien. Es werden also moderate Bedingungen simuliert.

Die Messdaten haben Zufallscharakter, da die Fahrzeuge Pkw , Lkw und der *CACC-ausgestattete Lkw in Verbänden* zufällig, wenn auch mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten

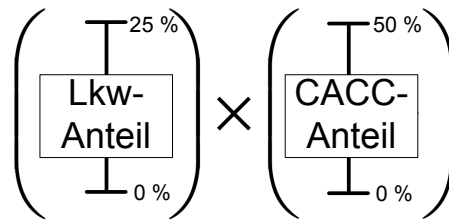


Abbildung 6.12.: Szenarienbildung für die Messdaten

ausgewählt werden. Weitere stochastische Effekte kommen dadurch hinzu, dass die Reihenfolge der Fahrzeuge je nach Simulation verändert wird (VISSIM-Variable: Startzufallszahl) und dass die Erhebung an drei Messquerschnitten erfolgt. Um statistische Sicherheit bei den Messungen zu erhalten, muss eine große Anzahl von Messpunkten erzeugt werden. Es werden deshalb die Szenarien mit jeweils 1 000 Durchläufen je Verkehrszusammensetzung simuliert. Aus diesen Daten können anschließend die q-v-Messpunkte für verschiedene Lkw-Anteile und CACC-Ausstattungsgrade aus einer Datenbank selektiert werden.

6.1.8. Beschreibung der generierten Daten und Ergebnisdarstellung

Aus den Simulationen konnten etwa 1 322 500 Datensätze in eine Datenbank geschrieben werden, welche sich nach Lkw-Anteil und CACC-Anteil auswerten lassen. Die Auswertung erfolgte für die Lkw-Anteile von 0 bis 25 Prozent und CACC-Ausstattungsgrade von 0 bis 50 Prozent. Aus der Datenbank wurden q-v-Daten aus allen Datensätzen ausgelesen, bei denen die Bedingungen erfüllt waren, dass sie einen bestimmten Lkw- und CACC-Anteil besitzen. Dabei wurden Stufen von jeweils 5 Prozent ausgewertet. Für jede Stufe wurde ein Bereich der Lkw- und CACC-Anteile von +/- 2 Prozent zugelassen (5 % = 3 bis 7 %, 10 % = 8 bis 12 % usw.). Durch dieses Vorgehen sind alle Datensätze von 0 bis 25 Prozent Lkw-Anteil und 0 bis 50 Prozent CACC-Anteil berücksichtigt worden.

Bei der Berechnung des Lkw- und des CACC-Anteils sowie der Verkehrsstärke ist beachtet worden, dass gekoppelte Fahrzeuge als ein Fahrzeug in VISSIM implementiert sind. Die Datenerhebung erfolgte in VISSIM pro Fahrzeugklasse. Die Fahrzeugverbände wurden von zwei bis sieben gekoppelten Fahrzeugen definiert. Bei der Berechnung des Lkw- und des CACC-Anteils sowie der Verkehrsstärke wurden nun die gemessenen Fahrzeugklassen mit der Anzahl der gekoppelten Lkw multipliziert. Die Geschwindigkeit wurde für Pkw pro 5 Minuten (quasi-momentan) gemessen.

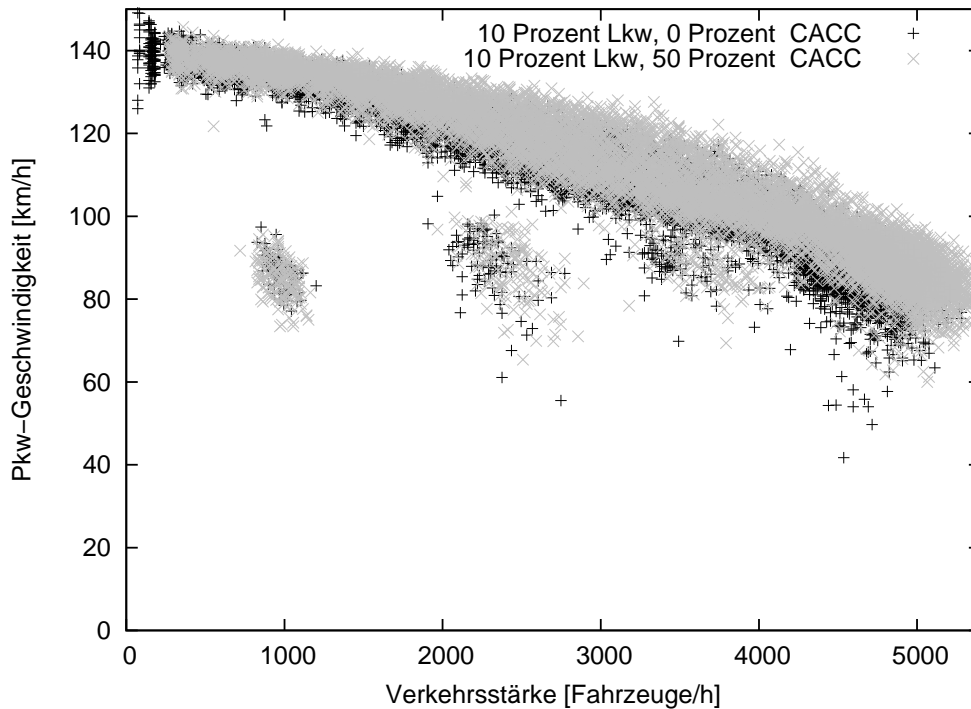


Abbildung 6.13.: Q-v-Daten bei 10 Prozent Lkw-Anteil und 50 Prozent CACC-Anteil

Die Daten können nun auf den Effekt hin untersucht werden, welche Wirkung CACC-ausgestattete Lkw auf den Verkehrsfluss ausüben.

Für die Ermittlung der Wirkungen wurden die Daten zuerst für eine Interpretation aufbereitet. Das bedeutet, eine Funktion wurde in ihren Parametern an die Daten angepasst, so dass die Menge an Daten durch einen Funktionsverlauf repräsentiert wird. Als Funktion wurde dazu die in Kapitel 5.10 hergeleitete CR-Funktion genutzt. Diese Funktion ist mit Gleichung 5.2 zuvor so umgestellt worden, dass sie die Geschwindigkeit als Funktionswert ausgibt und für diesen Zweck eingesetzt werden kann. Die gefundenen Funktionsparameter α , β und γ sind im Anhang D dargestellt. Für das Beispiel von 10 Prozent Lkw-Anteil sind die Daten in Abbildung 6.13 visualisiert und die repräsentativen Kurven für alle CACC-Anteile in Abbildung 6.14 dargestellt. Anhand der verschiedenen Kurven kann die Wirkung von CACC aufgezeigt werden.

Durch die Datenerhebung sollten Wirkungen von CACC auf die *durchschnittliche Geschwindigkeit* und die *Kapazität* ermittelt werden. Im folgenden Kapitel werden diese Wirkungen in die makroskopische Kenngröße *Reisezeit* transformiert.

Methodisch wurde die Veränderung der Kapazität und der Geschwindigkeit anhand der

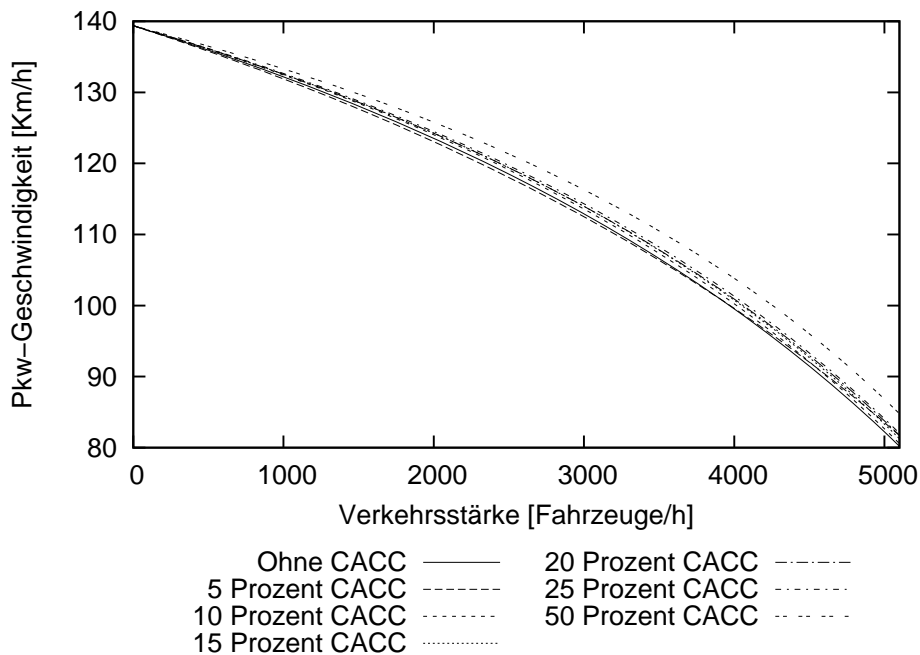


Abbildung 6.14.: Q-v-Diagramm bei 10 Prozent Lkw-Anteil und verschiedenen CACC-Anteilen

veränderten Funktionsverläufe bestimmt. Dazu wurde jeweils die Veränderung zum Ausgangswert (Funktionswert ohne CACC-Einfluss) ermittelt. Die Aussagen der Veränderungen werden prozentual erfolgen (siehe Abbildung 6.15).

Bei der Auswertung der Daten kann ein Effekt durch CACC auf die Kapazität der Strecke festgestellt werden. Das bedeutet, dass bei den Simulationen mit CACC eine erhöhte Verkehrsstärke die Strecke passieren kann, ohne dass der Verkehr zusammenbricht. Dieser Effekt wird allerdings erst bei höheren Anteilen von CACC-Konvois spürbar. Bei 10 Prozent Lkw-Anteil und 50 Prozent durch CACC aneinander gekoppelter Lkw konnte eine Steigerung der Kapazität um 4 Prozent berechnet werden. Im Szenario mit einem Lkw-Anteil im Verkehrsfluss von 25 Prozent, von denen 50 Prozent mit CACC ausgestattet sind, ist die Kapazität um knapp 6 Prozent gesteigert worden. Diese Wirkung auf den Verkehrsfluss ist damit auch die deutlichste, die für CACC gemessen wurde. In Tabelle 6.5 sind für die Lkw-Anteile von 0 bis 25 Prozent und die mittleren und extremen Ausstattungsgrade von 25 bzw. 50 Prozent die jeweiligen Kapazitätssteigerungen aufgeführt.

Die durchschnittliche Pkw-Geschwindigkeit erhöht sich durch den Einsatz von CACC bei schweren Lkw. Die größte Steigerung - um 6,4 Prozent - zeigt sich bei 15 Prozent Lkw-Anteil

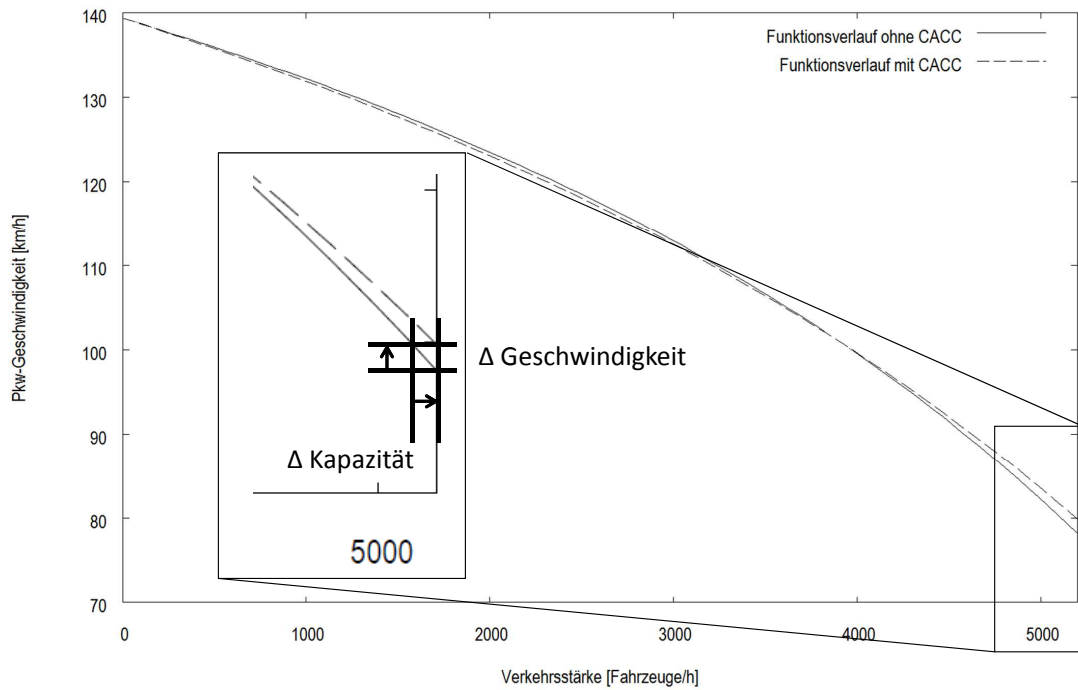


Abbildung 6.15.: Auswertungsprinzip für die Wirkungen von CACC

Lkw-Anteil	CACC-Anteil	
	25 %	50 %
5 %	0,77 %	2,11 %
10 %	1,66 %	4,11 %
15 %	2,48 %	5,45 %
20 %	1,88 %	5,06 %
25 %	1,39 %	5,75 %

Tabelle 6.5.: Kapazitätserweiterung von Autobahnen durch CACC-ausgestattete Lkw

Lkw-Anteil	CACC-Anteil	CACC-Anteil
	25 %	50 %
5 %	1,23 %	3,70 %
10 %	2,28 %	5,70 %
15 %	2,75 %	6,38 %
20 %	1,95 %	5,50 %
25 %	1,25 %	5,56 %

Tabelle 6.6.: Geschwindigkeitssteigerung auf Autobahnen durch CACC-ausgestattete Lkw

und 50 Prozent CACC-ausgestatteten Lkw. Bei Ausstattungsgraden von 50 Prozent ergeben sich etwa für die Lkw-Anteile von 10 bis 25 Prozent Steigerungen von 5,5 bis 6,4 Prozent. Damit muss festgestellt werden, dass der Einfluss von hohen Ausstattungsgraden in etwa gleich auf die Pkw-Geschwindigkeit wirkt (siehe Tabelle 6.6). Der bekannte Zusammenhang zwischen Lkw-Anteil und Pkw-Geschwindigkeit wie er im HBS [15] gezeigt wird, schwächt sich unter dem Einfluss von CACC ab. Als Erklärung dafür kann dienen, dass die Störungen des Pkw-Verkehrs (z. B. notwendige Überholvorgänge) weniger bei gekoppelt fahrenden Lkw werden.

Bei niedrigeren Anteilen von ausgestatteten Lkw besteht ein leicht positiver, jedoch vernachlässigbar kleiner Effekt. Man kann konstatieren, dass sehr lange Fahrzeuge den Verkehrsfluss nicht beeinträchtigen. Im Gegenteil, es ist auf dreispurigen Autobahnen vorteilhaft, dass Lkw in kleinen Abständen und in Kolonnen fahren. Teilweise allein fahrende Lkw beeinflussen dagegen den Pkw-Verkehr deutlich negativer.

Legt man die Messpunkte in eine idealtypische Funktion mittels der Methode der kleinsten Quadrate, verändert sich der Verlauf der q-v-Daten nicht maßgebend. Der Graph ist jedoch etwas flacher, was die Kapazitätserweiterung und Geschwindigkeitssteigerung erklärt (siehe Abbildung 6.13).

Die Effekte auf den Verkehrsfluss dreispuriger Autobahnen, die in dieser Arbeit durch CACC-ausgestattete Lkw ermittelt wurden, können mit folgenden Kernaussagen charakterisiert werden:

- Die Kapazität der Strecke kann um bis zu 6 Prozent gesteigert werden.
- Hohe Lkw-Anteile und hohe Ausstattungsgrade zeigen die größten Wirkungen auf die Kapazität. Wird einer der beiden Parameter gesenkt, sinken auch die Wirkungen auf die Kapazität der Strecke.

- Die durchschnittliche Pkw-Geschwindigkeit wird durch gekoppelte Lkw um bis zu 6,4 Prozent gesteigert.
- Die Steigerung der Pkw-Geschwindigkeit ist für verschiedene Lkw-Anteile relativ gleichmäßig.
- Die Wirkungen sind nicht-linear.
- Die Kapazität der Strecke ist bei niedrigen Ausstattungsgraden nahezu unbeeinflusst.
- Es wurden keine negativen Einflüsse auf den Verkehrsfluss bei hohen oder niedrigen Ausstattungsgraden festgestellt.

Die Wirkungen auf den Verkehrsablauf von CACC bei Lkw ordnen sich in die Erkenntnisse zu Kapazitätseffekten von Telematik anderer Forschungsprojekte. So wurde im Projekt CHAUFFEUR II für das System Chauffeur-Assistent bei einem Ausstattungsgrad von 40 Prozent eine Wirkung auf die Kapazität einer dreispurigen Autobahn von Plus 3,6 Prozent ermittelt (siehe Tabelle 2.2). Für den Einsatz von Adaptive Cruise Control (ACC) bei allen Fahrzeugen (Pkw und Lkw) wurde bei der Simulation eines Engpasses (Straßenverjüngung) für einen Ausstattungsgrad von 50 Prozent eine Kapazitätssteigerung von 16 bis 21 Prozent ermittelt (siehe Kapitel 2.4).

Die Simulation eines Engpasses auf einer niederländischen Autobahn mit einem Lkw-Anteil von 4 Prozent und einer Ausstattung aller Fahrzeuge (Pkw und Lkw) mit CACC zeigte bei verschiedenen Ausstattungsgraden der Fahrzeuge leicht positive Wirkungen von bis zu 5 Prozent auf die Geschwindigkeit. Auch dort wurde festgestellt, dass sich die Geschwindigkeit nicht gleichmäßig erhöht, sondern bei mittleren Ausstattungsgraden von 20 bis 60 Prozent niedriger ist als bei hohen Ausstattungsgraden. Interessant ist, dass dieses Ergebnis sich umgekehrt zu dem in dieser Arbeit darstellt, in der bei mittleren Ausstattungsgraden die größte Wirkung auf die Geschwindigkeit registriert wurde (siehe Kapitel 2.6 Abbildung 2.7). Das ist jedoch auch unter den Rahmenbedingungen *Ausstattung aller Fahrzeuge, 2 Prozent Lkw-Anteil, Simulation eines Engpasses* ermittelt worden und kann daher nur als Vergleich herangezogen werden.

Alle bisherigen Ergebnisse basieren auf mikroskopischen Simulationen. Es wurden unterschiedliche Simulationsprogramme genutzt und auch die modellierten Rahmenbedingungen unterscheiden sich. Somit kann konstatiert werden, dass die Simulationen in einem Ergebnisbereich liegen, der plausibel ist.

6.1.9. Kritische Würdigung der Wirkungen von CACC auf den Verkehrsablauf

In den Simulationen des Verkehrsablaufes wird erkennbar, dass es möglich ist, die Leistungsfähigkeit einer dreispurigen Autobahn zu erhöhen, wenn schwere Lkw und Sattelzüge mit CACC gekoppelt fahren. Die Auswertung der Daten zeigt, dass sich die Kapazität erst bei hohen Ausstattungsgraden deutlich steigert. Insgesamt sind die Wirkungen auf den Verkehrsablauf und die Kapazität der Strecke aber auf einem niedrigen Niveau. In [43] wird diskutiert, dass die Kapazität eine stochastische Größe ist und von der zufälligen Zusammensetzung der Fahrer, der Fahrzeuge, vom zufälligen Verkehrsablauf, den äußeren Bedingungen (wie Wetter) etc. abhängig ist. In die Simulationen für die Ermittlung der Wirkungen von CACC sind stochastische Effekte eingegangen, wie verschiedene Messquerschnitte, unterschiedliche Fahrer, Fahrzeuge und die zufällige Zusammensetzung im Verkehrsablauf. Auch wurden die Daten in 5-Minuten-Intervallen erhoben, wie es in [43] als geeignet beschrieben wird. Somit kann theoretisch eine hohe Validität der Ergebnisse unterstellt werden. Die ermittelten Wirkungen müssen jedoch im Abgleich mit der Realität diskutiert werden. So ist der Verkehrsablauf ohne Ein- und Ausfahrten und ohne die Konvoibildung der Fahrzeuge simuliert worden. Das die Simulationen dennoch „realitätsnah“ sind, lässt sich mit der Studie EFAS [95] belegen. Zum einen sollen die Fahrzeuge laut dieser Studie in Bereichen wie Aus- und Einfädlung, Baustellen, Brücken etc. aus Sicherheitsgründen entkoppeln. Weiterhin ist die fahrerorganisierte Konvoibildung die wahrscheinlichste Einsatzform von CACC, was das gemeinsame Starten der Fahrt von Rastplätzen und Depots aus ermöglicht. Die Fahrer finden sich auch heute schon in Gruppen für gemeinsame Wege. Diese Argumente stellen jedoch nicht sicher, dass es Störungen im Verkehrsablauf gibt, die nicht in der Simulation abgebildet sind. Das Wesen von Modellen ist die Vereinfachung der Realität.

Die Ergebnisse der Simulationen sind auch aus Verkehrssystemperspektive zu würdigen. Die Fahrer haben ihr Fahrverhalten im Szenario mit CACC gegenüber dem Basisfall ohne CACC nicht geändert. Das ist deshalb zu diskutieren, weil davon auszugehen ist, dass sich zum Zeitpunkt, an dem sich eine hohe Diffusionsrate von CACC bei Lkw einstellt, auch die Fahrzeuge und das Fahrzeugverhalten verändert haben. Es gibt seit Jahren den Trend, die Fahrzeuge mit mehr Sicherheitstechnik und Telematik zur Fahrerunterstützung auszustatten. Daher sind die Fahrer in der Lage, das Auto auch anders zu führen, als es noch vor z. B. 20 Jahren der Fall war. Darüber hinaus wird in vielen EU-Projekten aktuell daran geforscht, dass Fahrzeuge mit Fahrzeugen und Fahrzeuge mit der Infrastruktur kommunizieren (siehe

Kapitel 2.1). Man kann unterstellen, dass sich CACC erst dann durchsetzen wird, wenn die verbleibenden Fahrzeuge von interaktiver Telematik unterstützt werden. Z. B. könnte das ein Signal für sich nähernde Pkw sein, dass 500 Meter voraus ein Konvoi von einer Gesamtlänge von 150 Metern fährt. Eine Empfehlung zum Verhalten wäre ebenfalls denkbar: Z. B., dass man, um den nächsten Parkplatz nutzen zu können, die Geschwindigkeit drosseln und sich hinter dem Konvoi einordnen sollte. Mit solchen Technologieszenarien würde sich der gesamte Verkehrsablauf ändern. Insgesamt ergibt sich dann die Herausforderung, ein Szenario mit verschiedenen fortgeschriebenen Entwicklungstrends für ein bestimmtes Zieljahr zu stellen und zu simulieren. Viele Trends können unterschiedlich bewertet und fortentwickelt werden. Dies erhöht die Komplexität und auch die Anzahl der Szenarien für die Einschätzung des Bereichs der erwarteten Wirkungen.

Diese Arbeit hat sich bewusst für die Entwicklung eines hypothetischen Trends, der Einführung und Diffusion von CACC bei schweren Lkw, entschieden, um die Komplexität des Szenarioprozesses auf einem erreichbaren Niveau zu halten. Im nächsten Kapitel werden die ermittelten Wirkungen von CACC in die makroskopische Modellierung integriert, indem die Daten in die CR-Funktionen überführt werden.

Innerhalb der Grenzen der wissenschaftlichen Möglichkeiten sind die Ergebnisse von hoher Qualität. Es konnten jedoch auch Argumente gefunden werden, die belegen, dass die durchgeführten Simulationen die Realität nur bedingt widerspiegeln können. Die ermittelten Wirkungen von CACC auf den Verkehrsablauf geben Hinweise zu den real zu erwartenden Wirkungen, falls das System CACC für den Straßenverkehr zugelassen wird.

Welchen Beitrag leisten die Simulationen für die Wissenschaft?

Erstmalig wurden CACC-ausgestattete Lkw im normalen Umgebungsverkehr in unterschiedlich langen Konvois simuliert. Damit konnten Effekte von Konvois auf den Umgebungsverkehr einer dreispurigen Autobahn ermittelt werden. Die Ergebnisse sind leicht positiv bzgl. der Kapazität der Strecke. Überlange Fahrzeuge stören somit den Verkehrsablauf auf der sechsstreifigen Autobahn nicht.

Dies ist auch interessant im Kontext der Diskussionen um den 25-Meter-Lkw, der in Deutschland noch nicht so zugelassen ist, wie in anderen europäischen Ländern, sondern nur in einer Ausnahmeregelung getestet wird. Verkehrstechnische Argumente, wie schlechtere Überholmöglichkeiten, sind Teil der Diskussion gegen die Zulassung [23]. Sicherheitsaspekte konnten in den Simulationen nicht berücksichtigt werden, doch es konnte nachgewiesen

werden, dass sich der Verkehrsablauf durch mehrere längere, statt einzelner Fahrzeuge insgesamt leicht verbessert, vor allem aber nicht verschlechtert.

7. Integration der Wirkungen von CACC in die CR-Funktion

Die CR-Funktion, welche den Lkw-Anteil und den CACC-Anteil berücksichtigt, wurde in Kapitel 5.10 hergeleitet. Dabei ist der Parameter α in der Formel 5.10 bereits abhängig vom Lkw-Anteil formuliert. Wird nun der CACC-Anteil hinzugefügt, so ergibt sich eine dreidimensionale Abhängigkeit des Parameters α . Damit würde sich bei der mathematisch korrekten Lösung ein nicht handhabbarer Term ergeben. Das ist bereits bei der Entwicklung der CR-Funktion mit Lkw-Anteil gezeigt worden (siehe Formel 5.9). Aus diesem Grunde wird im Folgenden eine vereinfachte (hinreichend genaue) dreidimensionale Funktion zur Abbildung der CACC-Effekte entwickelt.

Der Parameter α wird als Funktion in Abhängigkeit vom Lkw-Anteil und CACC-Anteil formuliert. Diese Funktion muss die Bedingung erfüllen, dass sie bei einem CACC-Anteil von 0 Prozent den Parameterwert von α ausgibt, wie er in der CR-Funktion mit Lkw-Anteil ermittelt wurde. Das bedeutet, dass nicht alle Funktionstypen eingesetzt werden können. Es gibt Funktionen, bei denen für einen CACC-Anteil von 0 Prozent der Funktionswert nicht definiert ist (z. B. $\ln(x)$ oder $\frac{ax+b}{x}$).

Die Entwicklung des Parameters α wurde für einen Lkw-Anteil zwischen 0 und 25 Prozent und einen CACC-Anteil von 0 bis 50 Prozent untersucht. Dazu wurde die in Kapitel 5.3 entwickelte CR-Funktion um den multiplizierten Term $f_\alpha(C_{CACC})$ mit $a \cdot x$ ersetzt (x ist der CACC-Anteil und a ein freier Parameter, der auch als Funktion formuliert werden kann).

$$f(q) = t_0 \cdot \frac{1,15 - (0,85 - \frac{T}{\tau} + a \cdot x) \cdot \left(\frac{q}{q_{max} \cdot 1,05}\right)}{1,15 - \left(\frac{q}{q_{max} \cdot 1,05}\right)} \quad (7.1)$$

Für den Term $a \cdot x$ wurden mit der Methode der kleinsten Quadrate jeweils die Werte für a ermittelt. Grafisch zeigt sich im Ergebnis, dass sich ein ähnlicher Funktionsverlauf für alle

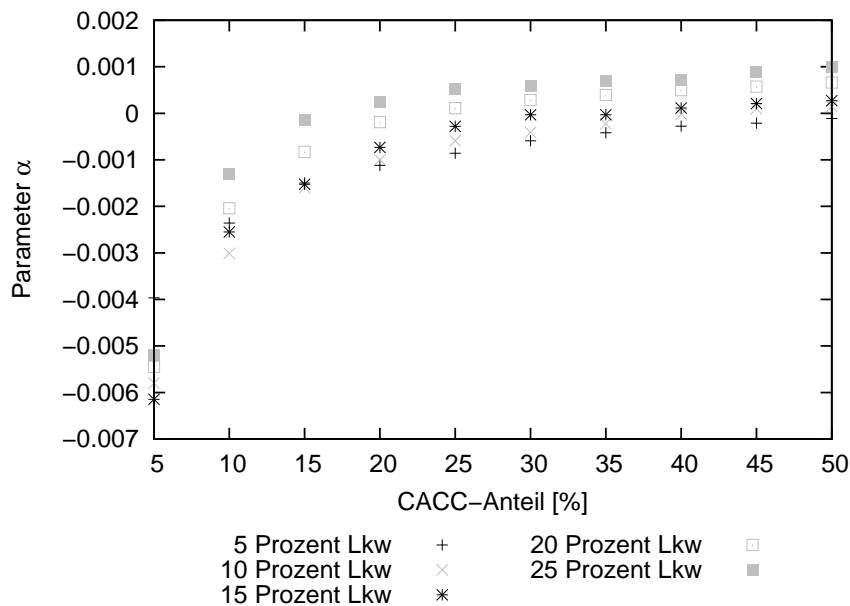


Abbildung 7.1.: Parameter α in Abhängigkeit vom CACC-Anteil für verschiedene Lkw-Anteile

Lkw-Anteile ergibt. Annähernd parallel verschobene Kurven können für die Entwicklung der Näherungslösung unterstellt werden (siehe Abbildung 7.1).

Mit geeigneter Software kann man nach Funktionen suchen, die einen Datensatz am besten repräsentieren. Hier wurde die Software *CurveExpert* [59] eingesetzt. Sucht man mit *CurveExpert* nach einer Funktion, die den Verlauf der jeweiligen Kurven reproduziert, so erhält man folgende Funktionsvorschrift:

$$\alpha = a(b - e^{-cx}) \tag{7.2}$$

für x als CACC-Anteil zwischen [0:50]

Im nächsten Schritt wurden die jeweiligen Parameter der Funktion (a, b, c) für jeden Lkw-Anteil entwickelt. Dies geschah mit der Methode der kleinsten Quadrate. Anschließend wurden die Parameter durch ungewichtete Mittelwertbildung zwischen den unterschiedlichen Werten als durchschnittliche Parameter berechnet. Damit wird unterstellt, dass der Parameterverlauf α für jeden CACC-Anteil gleich ist und dieser durchschnittliche Kurvenverlauf durch den Lkw-Anteil entsprechend parallel verschoben wird (siehe Abbildung 7.2).

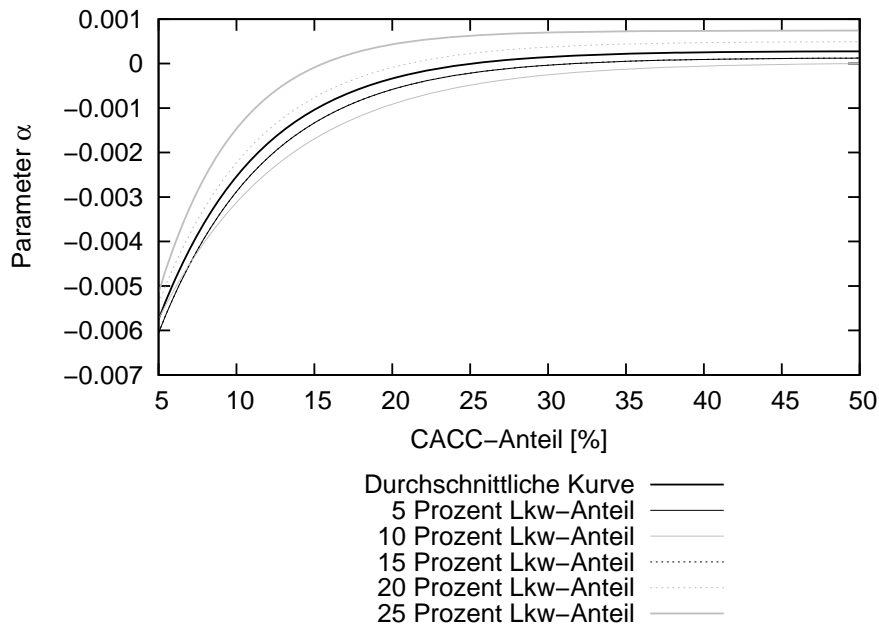


Abbildung 7.2.: Entwicklung eines durchschnittlichen Kurvenverlaufes

Die Parameter sind nun als Term in Abhängigkeit vom Lkw-Anteil und CACC-Anteil definiert: $0,85 - \frac{T}{\tau} + (0,01289212 \cdot (0,02200165 - \exp(-0,1519044 \cdot C_{CACC})))$. Die Funktion ist an den Rändern ($x = 0$ und $y = 0$) definiert. Allerdings würde sie bei einem CACC-Anteil von 0 Prozent nicht den α -Wert ausweisen, der für Lkw-Anteile entwickelt wurde. Das liegt daran, dass sich beim Einsetzen einer Null in $0,01289212 \cdot (0,02200165 - \exp(-0,1519044 \cdot 0))$ ein Wert von $-0,012608$ ergibt, was insgesamt nur einer minimalen Verzerrung entspricht. Um den Term an die formale Anforderung dennoch anzupassen, so dass sich für einen CACC-Anteil von null der ursprüngliche α -Wert ergibt, muss $0,012608$ als Summand integriert werden mit der Vorschrift: $0,85 + 0,012608 - \frac{T}{\tau}$.

Ein weiterer Aspekt der Funktion ist, dass sich der Parameter α bei einem Lkw-Anteil von 0 Prozent für verschiedene CACC-Anteile weiterentwickelt. Die Funktion ist trotzdem nutzbar und valide, da dieser Fall datenseitig ausgeschlossen werden kann. Wenn keine Lkw in der Verkehrszusammensetzung vorhanden sind, können auch keine mit CACC ausgestatteten Lkw erfasst werden.

Die finale Funktion ist in Abbildung 7.3 dargestellt.

Diese Funktion des Parameters α kann nun in die vorbereitete CR-Funktion integriert werden. Sie enthält damit den erforderlichen dreidimensionalen Term, der in Abhängigkeit

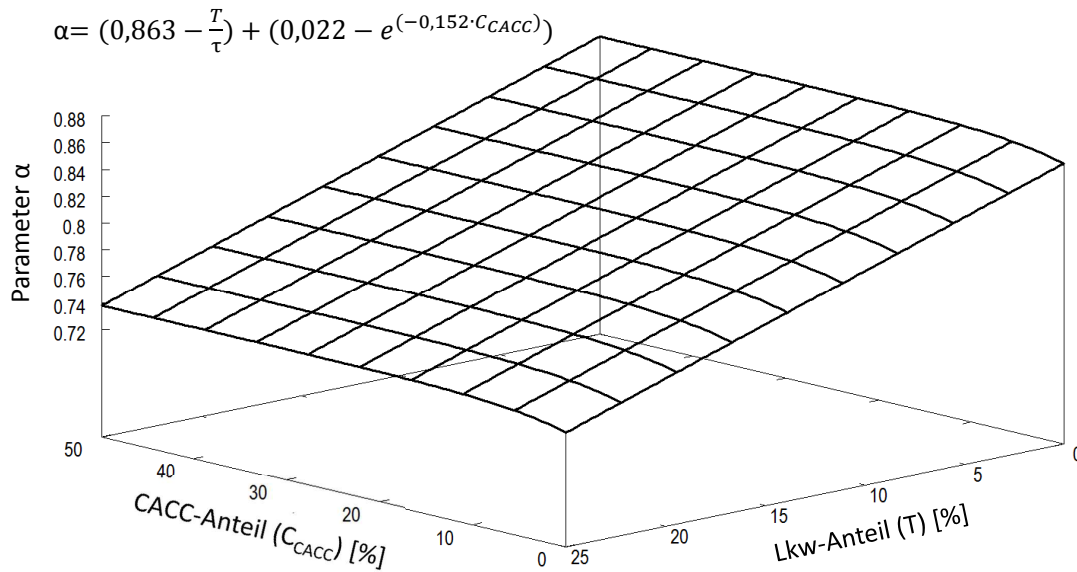


Abbildung 7.3.: Dreidimensionaler Term für α in der CR-Funktion

vom Lkw-Anteil (T) und CACC-Anteil (C_{CACC}) den Parameter α bildet und somit die Reisezeit anpasst (siehe Formel 7.3).

$$f(T, C_{CACC}, q) = t_0 \cdot \frac{1,15 - \left(\left(0,863 - \frac{T}{\tau}\right) + \left(0,022 - e^{(-0,152 \cdot C_{CACC})}\right)\right) \cdot \left(\frac{q}{1,05 \cdot q_{max}}\right)}{1,15 - \left(\frac{q}{1,05 \cdot q_{max}}\right)} \quad (7.3)$$

Die Wirkungen von CACC auf den Verkehrsfluss wurden mittels des Parameters *Reisezeit* in das Konzept der makroskopischen Verkehrsmodellierung integriert. Dazu sind die Wirkungen von elektronisch gekoppelten Lkw dezidiert in Verkehrsflusssimulationen ermittelt worden. Dadurch erhobene Daten lassen einen leicht positiv veränderten Verkehrsfluss erkennen. Je größer der Anteil an Lkw und der CACC-Ausstattungsgrad, desto stärker verringert sich die Pkw-Reisezeit im Vergleich zur Situation ohne CACC. Diese Wirkungen konnten als Parameter in eine Capacity-Restraint-Funktion integriert werden. Als ein Ergebnis dieser Arbeit kann nun die Reisezeit in Abhängigkeit vom Lkw-Anteil und CACC-Ausstattungsgrad berechnet werden.

Die Methode zur Integration von Telematik-Wirkungen in die makroskopische Verkehrsmodellierung konnte am Beispiel des Einsatzes von Cooperative Adaptive Cruise Control im Güterverkehr erfolgreich umgesetzt werden (siehe Abbildung 7.4).

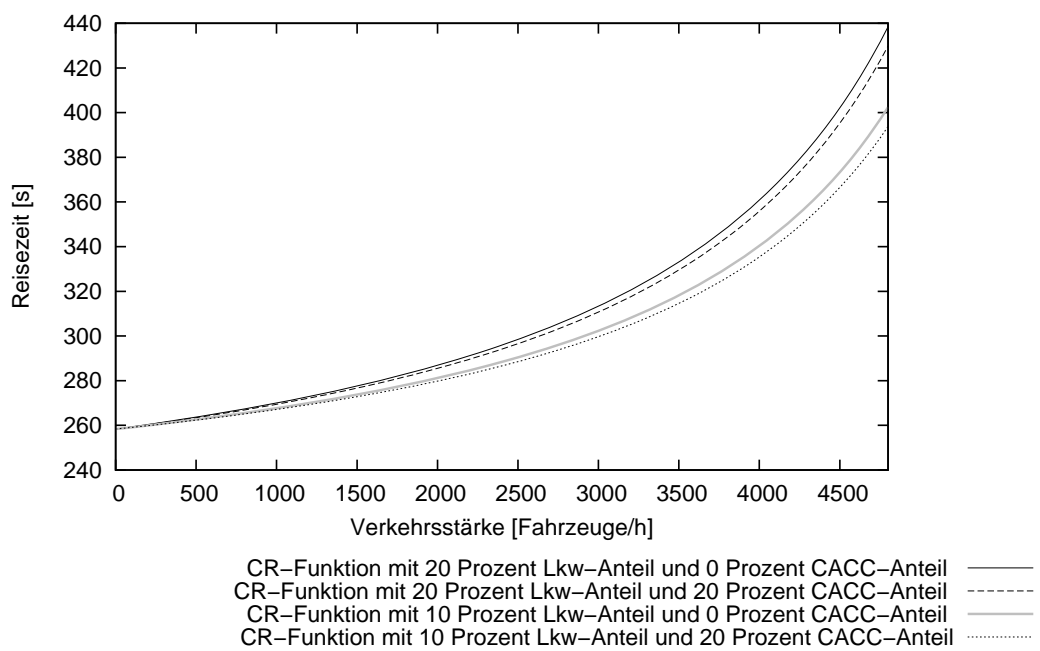


Abbildung 7.4.: CR-Funktion mit unterschiedlichen CACC- und Lkw-Anteilen

8. Zusammenfassung der Erkenntnisse und wissenschaftlicher Ausblick

In den ersten Kapiteln wurden die Wirkungen von Telematik und die makroskopische Verkehrsmodellierung beschrieben. Es konnte im Folgenden eine Methode entwickelt werden, mit der sich die Wirkungen von Telematik in die makroskopische Verkehrsmodellierung integrieren lassen.

Die Methode ist auf das Telematiksystem Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC), eingesetzt bei Lkw über 12 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht und Sattelzugmaschinen auf dreispurigen Autobahnen, angewandt worden.

Stufe 1 der Methode (Wirkungsermittlung):

In der ersten Stufe der Methode müssen die Wirkungen des betrachteten Telematiksystems ermittelt werden. Weiterhin muss bestimmt werden, welche Faktoren die Wirkung beeinflussen.

Für CACC sind Wirkungen auf die Reisezeit, die Kapazität, die Sicherheit und den Kraftstoffverbrauch bekannt, welche durch das veränderte Fahrzeugfolgeverhalten verursacht werden. Für den Kraftstoffverbrauch ist der wesentliche Einflussfaktor der Abstand der Fahrzeuge während der Fahrt. Der entscheidende Einflussfaktor für alle anderen Wirkungen ist jeweils die Menge der ausgestatteten Fahrzeuge.

Stufe 2 der Methode (Transformation in makroskopische Kennwerte):

Für die zweite Stufe der Methode müssen makroskopische Kennwerte bestimmt werden, in die die Wirkungen aus der ersten Stufe transformiert werden können.

Die Wirkungen von CACC wurden auf die makroskopischen Kennwerte *Reisezeit*, *Kosten* und *externe Kosten* transformiert. Dazu wurde eine Widerstandsfunktion

beschrieben, welche diese drei Kennwerte enthält. In der weiteren Anwendung der Methode konzentrierte sich die Betrachtung auf die Wirkung *Reisezeit*. Die anderen Wirkungen wurden nicht berücksichtigt.

Stufe 3 der Methode (Integration von Gesetzmäßigkeiten der Telematikwirkungen in die Modellparameter):

Damit die in Stufe 2 ermittelten makroskopischen Kennwerte im Modell wirken können, müssen Gesetzmäßigkeiten entwickelt werden, welche die Wirkung von Telematik und deren Einflussfaktoren (siehe Stufe 1) im makroskopischen Kennwert abbilden.

Die *Reisezeit* ist ein Parameter der Widerstandsfunktion und wird über eine so genannte CR-Funktion in makroskopischen Modellen ermittelt. Für das Anwendungsbeispiel CACC wurde die CR-Funktion für die Berücksichtigung der Wirkungen des Telematiksystems angepasst.

Weil es noch keine für deutsche Autobahnen gültige CR-Funktion gibt, die den Einfluss der Lkw auf die Pkw-Geschwindigkeit berücksichtigt, wurde eine solche Funktion entwickelt.

Ebenfalls nicht bekannt waren die expliziten Wirkungen von CACC auf den Verkehrsablauf, wenn Lkw mit dem System ausgestattet fahren. Mittels Simulationen in VISSIM sind diese Wirkungen ermittelt und beschrieben worden. Anschließend konnten die Änderungen in die vorbereitete CR-Funktion integriert werden, indem diese mit Parametern um die Wirkung von CACC erweitert wurde. Die Integration der Wirkungen von CACC in die makroskopische Verkehrsmodellierung ist somit über eine CR-Funktion in Abhängigkeit von der gesamten Verkehrsstärke, dem Lkw-Anteil und dem Anteil ausgestatteter Lkw erreicht worden.

Die Methode konnte erfolgreich umgesetzt werden und damit an einem ersten Beispiel gezeigt werden, dass die makroskopische Modellierung in der Lage ist, Telematikwirkungen exakt abzubilden.

Die Methode ist als ein allgemeingültiger Prozess formuliert und kann für weitere Telematikanwendungen umgesetzt werden. Damit ergibt sich der Vorteil, dass dieser Prozess für gegenwärtige, aber auch zukünftige Anwendungen spezialisiert angewandt werden kann. Voraussetzung ist jeweils, dass die Gesetzmäßigkeiten zu den Wirkungen der Telematik bekannt sind bzw. ermittelt werden können. Weiterhin ist die Methode in allen gängigen makroskopischen 4-Stufen-Verkehrsmodellen anwendbar und wird damit dem State of the

Art gerecht. Die makroskopische Verkehrsmodellierung hat gegenüber der mikroskopischen den Vorteil, dass die Wirkungen von Telematik auf große Untersuchungsräume abgebildet werden können und damit Systemwirkungen sichtbar werden.

Mit dem Abschluss der Untersuchungen und der Arbeiten im Rahmen der Dissertation bleiben verschiedene Fragestellungen an die wissenschaftliche Gemeinschaft. Diese sollen im Folgenden aufgeführt und begründet werden.

Im Kapitel 2 wird auf den Untersuchungsgegenstand Telematik eingegangen. In der Literatur besteht noch keine einheitliche und zu anderen Begriffen disjunkte Definition von Telematik. Oft werden Informations- und Kommunikationstechnologien oder einzelne Anwendungen ebenfalls als Telematik bezeichnet. In der vorliegenden Arbeit wurde ein Vorschlag zur Definition von Telematik erarbeitet. Es ist empfehlenswert, diesen Vorschlag und andere existierende Definitionsansätze in einer wissenschaftlichen Diskussion zu konsolidieren und eine Definition von Telematik zu etablieren. Innerhalb dieses Gerüsts können dann bestehende und neue Telematikanwendungen konsistent beschrieben und untersucht werden.

Weiterhin scheint die Diskussion um die Wirkungen von Telematik sehr positiv geprägt. Dies ist bei der Recherche nach bekannten Wirkungen von Telematik und der Darstellung des Wissenstandes in Kapitel 2.2 deutlich geworden. Eine kritische Auseinandersetzung mit den ermittelten Wirkungen ist in Forschungsprojekten und den realen Gegebenheiten nötig. Für die ermittelten Wirkungen von CACC in dieser Arbeit ist das in Kapitel 6.1.9 geschehen.

Das Kapitel 3 gibt eine Übersicht über Methoden und den Stand der makroskopischen Verkehrsmodellierung. Dabei und bei der Erarbeitung einer Methode zur Integration der Wirkungen von Telematik hat sich als wichtiges zukünftiges Forschungsfeld der Einsatz von Widerstandsfunktionen (Nutzenfunktionen) in den Modellen herauskristallisiert. Es bleiben Fragen zur mathematischen Form der Nutzenfunktion, zu den über die Reisezeit hinausgehenden einsetzbaren Komponenten der Nutzenfunktion als auch zur Gewichtung der Nutzenkomponenten für die weiterführende wissenschaftliche Arbeit. Mit der Beantwortung dieser Fragen wird die makroskopische Verkehrsmodellierung schlüssiger im Zusammenspiel der vier Modellierungsstufen und flexibler in der Abbildung von Maßnahmen und von zeitlich veränderten Rahmenbedingungen des Verkehrssystems, wie beispielsweise der Zunahme von telematischen Anwendungen in Verkehrsprozessen.

Für die Berechnung der Reisezeit auf einer Strecke ist in der vorliegenden Arbeit eine wichtige Verbesserung des Status Quo erarbeitet worden. Die Berechnung der Pkw-Reisegeschwindigkeiten in CR-Funktionen wird nun der realen Gegebenheit gerecht, dass der Lkw-Anteil einer Strecke die Pkw-Geschwindigkeiten beeinflusst (siehe Kapitel 5.10). Es ist darüber hinaus jedoch auch bekannt, dass die Neigung einer Strecke ebenfalls Einfluss auf die Pkw-Geschwindigkeiten hat. Um diesen Aspekt in CR-Funktionen zu integrieren, sind weitere Forschungsaktivitäten bzgl. CR-Funktionen nötig. Wichtig ist dieses Thema, da CR-Funktionen ein fundamentales Instrument der makroskopischen Verkehrsmodellierung sind.

In [31] wird auch eine zeitlich veränderte Entwicklung von Pkw-Reisegeschwindigkeiten über die Jahre 1950-2000 beschrieben. Dieser Aspekt bleibt für die Prognose von zukünftigen Verkehrszuständen zu untersuchen, ggf. zu berücksichtigen und in die Entwicklung von CR-Funktion zu integrieren.

Die Datenerhebung bezüglich der Wirkungen auf den Verkehrsablauf durch den Einsatz von CACC bei schweren Lkw wurde bereits in Kapitel 6.1.9 kritisch bewertet. Ohne dass das System im Verkehr zugelassen ist, bleiben Simulationen des Verkehrsablaufes das sinnvollste Analyseinstrument für die Ermittlung von Wirkungen. Über die bestehenden Diskussionen hinaus sind verbindliche rechtliche Rahmenbedingungen von derart fortschrittlichen Fahrerassistenzsystemen zu erforschen. Es sind - und das zeigen die Ergebnisse von unterschiedlichen Forschungsprojekten - Aussagen zu einem Ergebnisbereich der Wirkungen möglich. Versagen des Systems, unwahrscheinliche, aber mögliche Einzelereignisse und daran gebundene Haftungsfragen usw. sind in einem juristischen Gerüst zu klären, damit die entwickelten Systeme den Markt diffundieren können.

Mit der erfolgreichen Umsetzung der Methode zur Integration der Wirkungen von Telematik in die makroskopische Verkehrsmodellierung am Beispiel der Reisezeiteffekte durch CACC ist ein neues Forschungsfeld eröffnet. Die makroskopische Verkehrsmodellierung ist in der Lage, Telematikwirkungen in bestehende Modellierungskonzepte zu integrieren und abzubilden. Die Methode verlangt eine mikroskopische und telematiksystemfeine Ermittlung der jeweiligen Effekte für eine exakte Abbildung. Das bedeutet auch, dass die mikroskopische und makroskopische Modellierung Leistungsmerkmale besitzen, die sich hervorragend ergänzen. Die Kombination von Mikro- und Makromodellen ist ein wichtiges Entwicklungsfeld für die gesamte Verkehrsmodellierung.

Es sind nun weitere Telematiksysteme in ihren Wirkungen systematisch zu untersuchen und an den abzubildenden Rahmenbedingungen der makroskopischen Verkehrsmodellierung zu

beteiligen. Hierzu ist als dringende Forschungsfrage zu bearbeiten, welche Telematikanwendungen die einflussreichsten und damit prioritär zu behandeln sind.

Die systematische Aufarbeitung und Integration von Telematik in die makroskopische Verkehrsmodellierung als Rahmenbedingung des Verkehrssystems ist ein neues und spannendes Forschungsfeld.

Anhang

A. Grafische Einstellung von Parametern in VISSIM

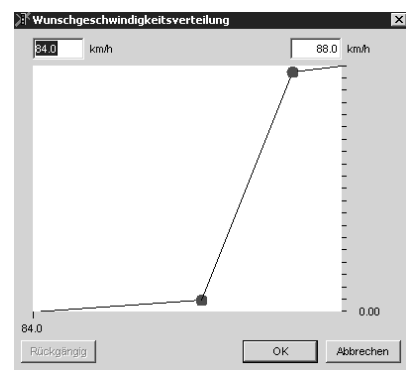
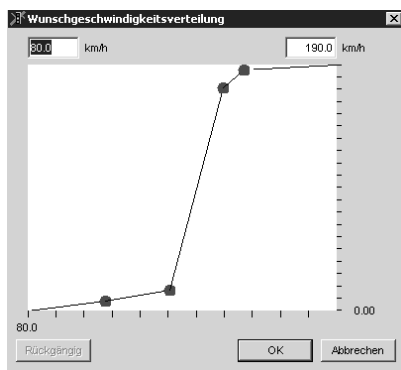


Abbildung A.1.: Verteilung der Wunschgeschwindigkeit von Pkw und Lkw in VISSIM

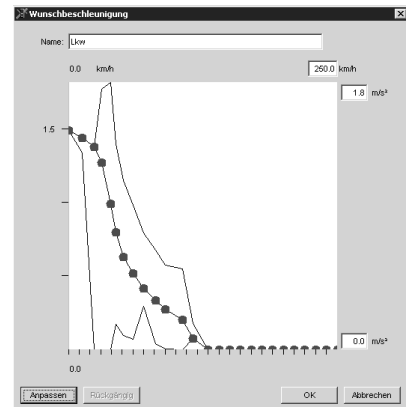
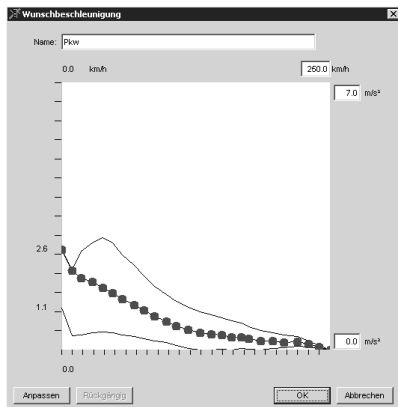


Abbildung A.2.: Verteilung der Wunschbeschleunigung von Pkw und Lkw in VISSIM

A. Grafische Einstellung von Parametern in VISSIM

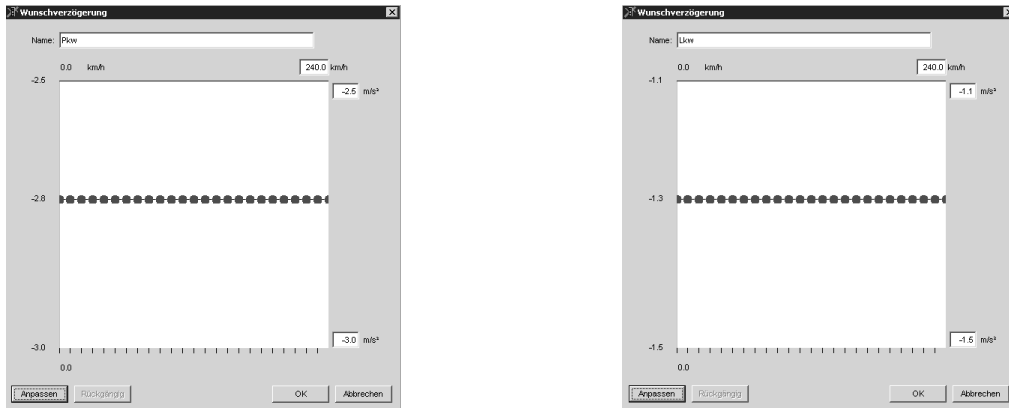


Abbildung A.3.: Verteilung der Wunschverzögerung von Pkw und Lkw in VISSIM

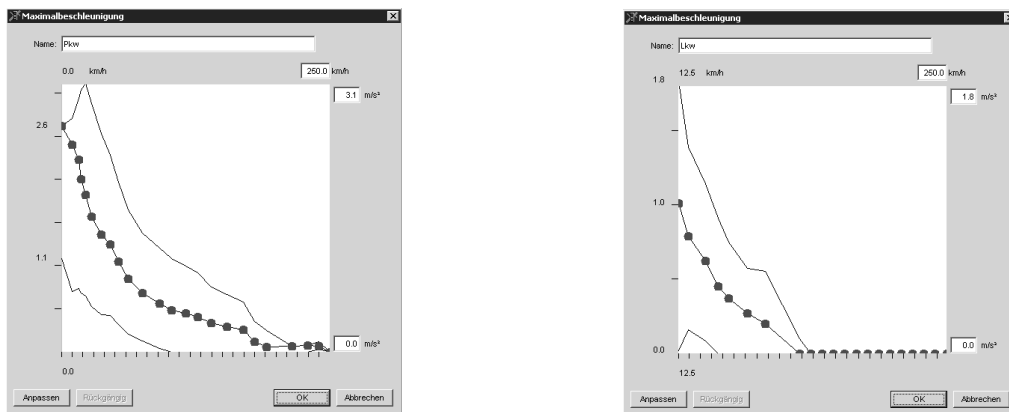


Abbildung A.4.: Verteilung der Maximalbeschleunigung von Pkw und Lkw in VISSIM

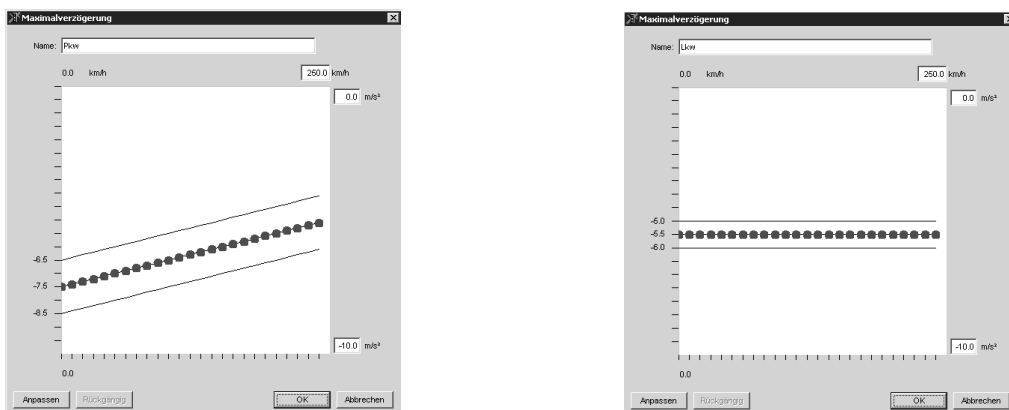


Abbildung A.5.: Verteilung der Maximalverzögerung von Pkw und Lkw in VISSIM

B. Grafiken zu den Ergebnissen der Kalibrierung

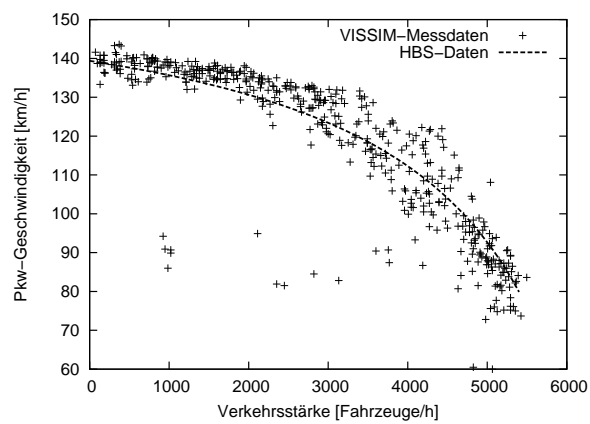


Abbildung B.1.: Q-v Diagramm für 100 Prozent Pkw

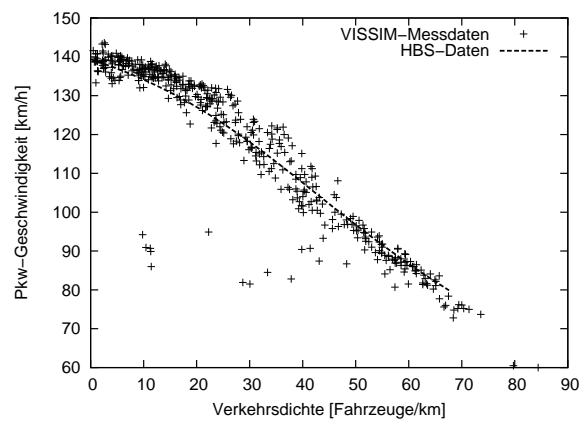


Abbildung B.2.: Q-k Diagramm für 100 Prozent Pkw

B. Grafiken zu den Ergebnissen der Kalibrierung

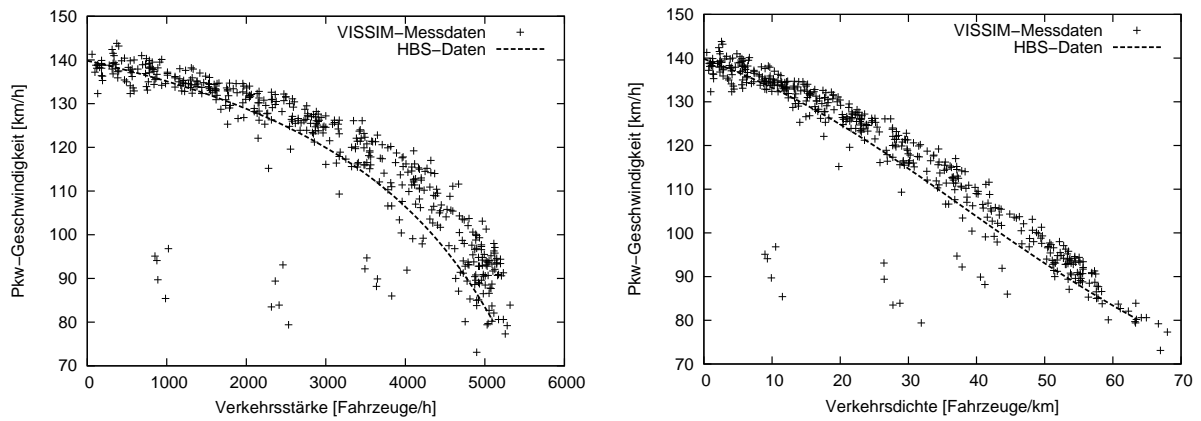


Abbildung B.3.: Q-v und q-k Diagramm mit 10 % Lkw und 0 % Streckenneigung

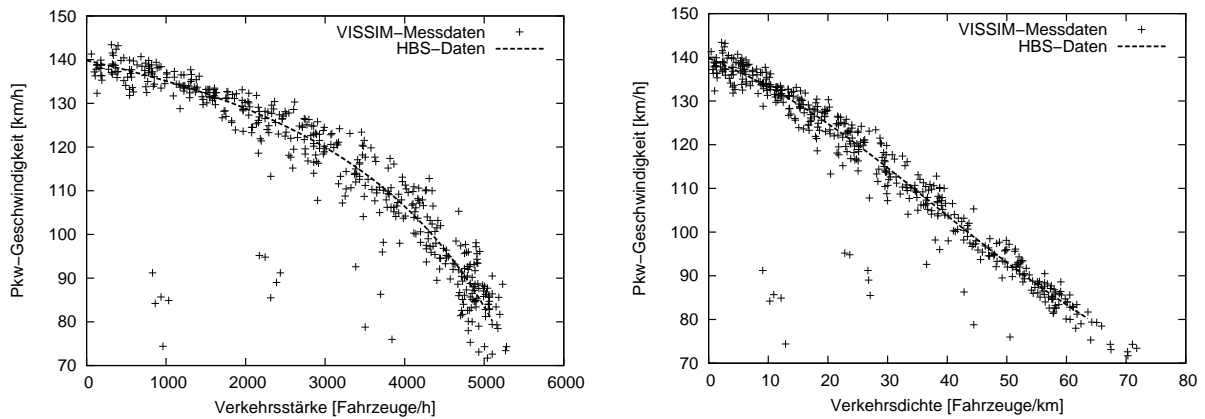


Abbildung B.4.: Q-v und q-k Diagramm mit 10 % Lkw und 1 % Streckenneigung

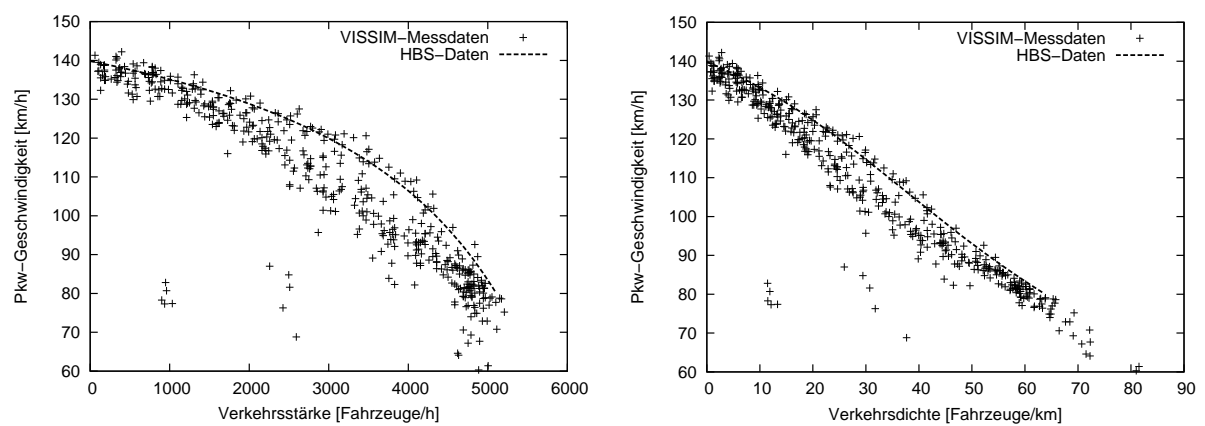


Abbildung B.5.: Q-v und q-k Diagramm mit 10 % Lkw und 2 % Streckenneigung

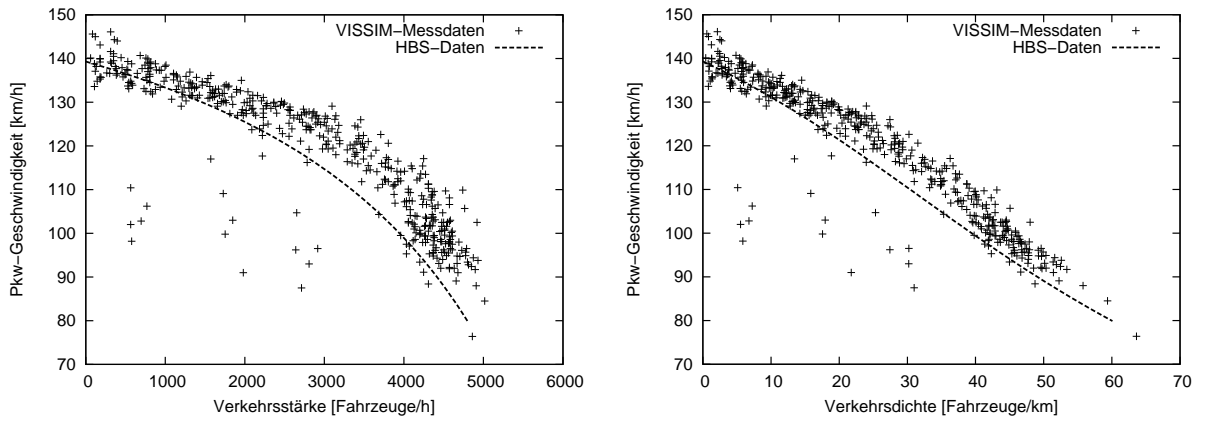


Abbildung B.6.: Q-v und q-k Diagramm mit 20 % Lkw und 0 % Streckenneigung

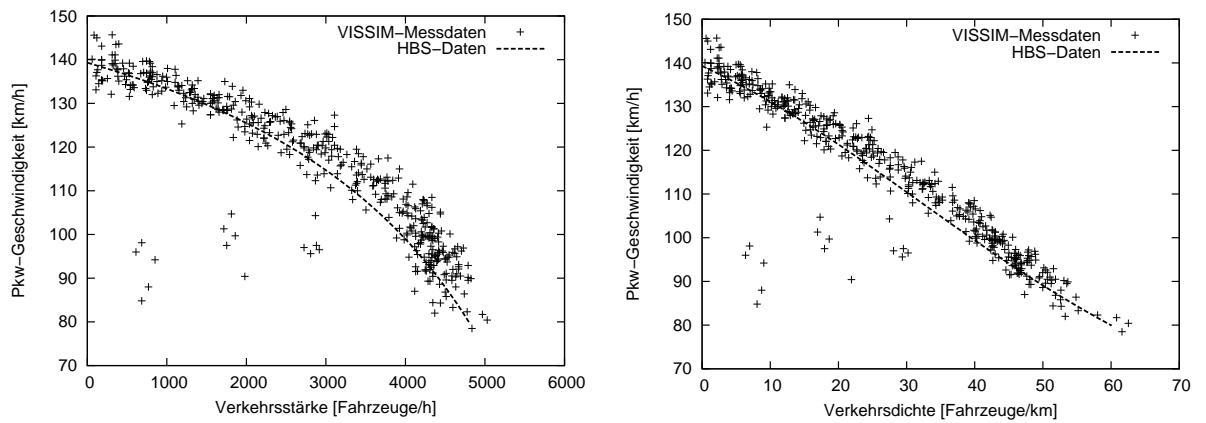


Abbildung B.7.: Q-v und q-k Diagramm mit 20 % Lkw und 1 % Streckenneigung

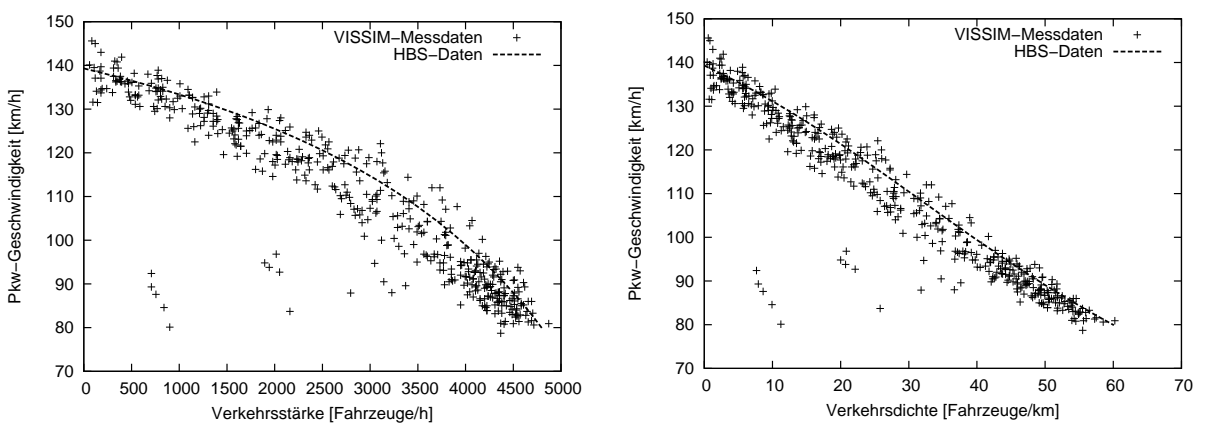


Abbildung B.8.: Q-v und q-k Diagramm mit 20 % Lkw und 2 % Streckenneigung

C. Parameter der CR-Funktion unter Berücksichtigung des Lkw-Anteils

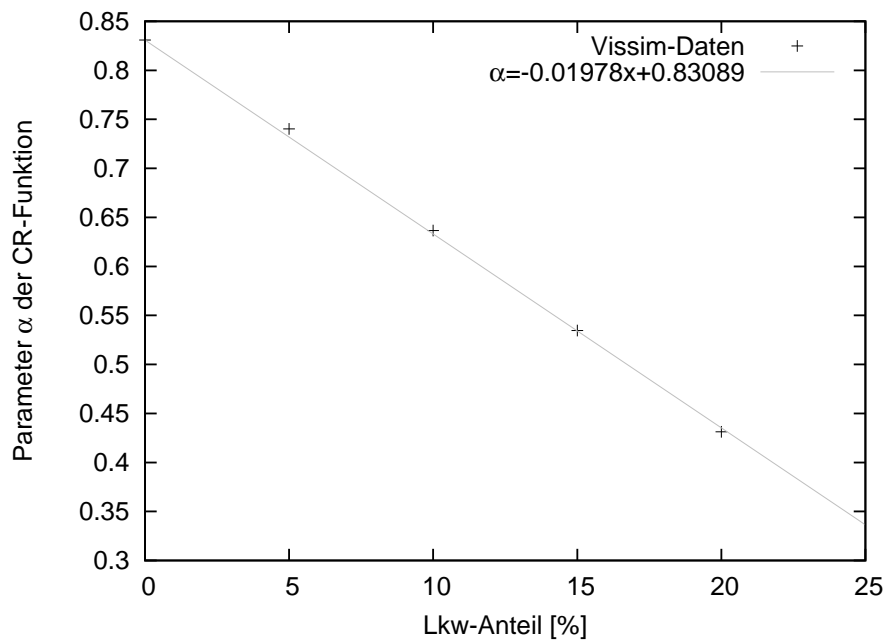


Abbildung C.1.: Funktionaler Zusammenhang für den Parameter α

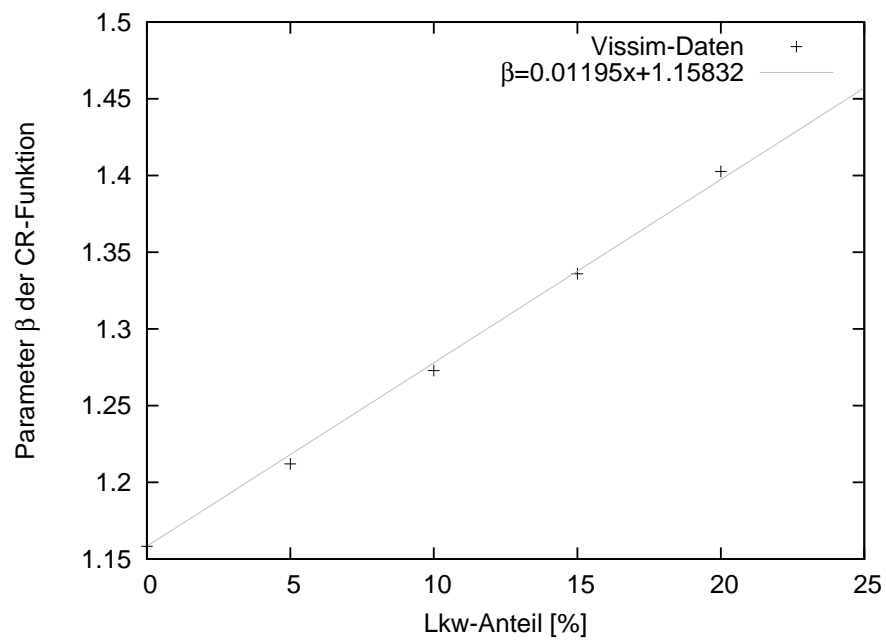


Abbildung C.2.: Funktionaler Zusammenhang für den Parameter β

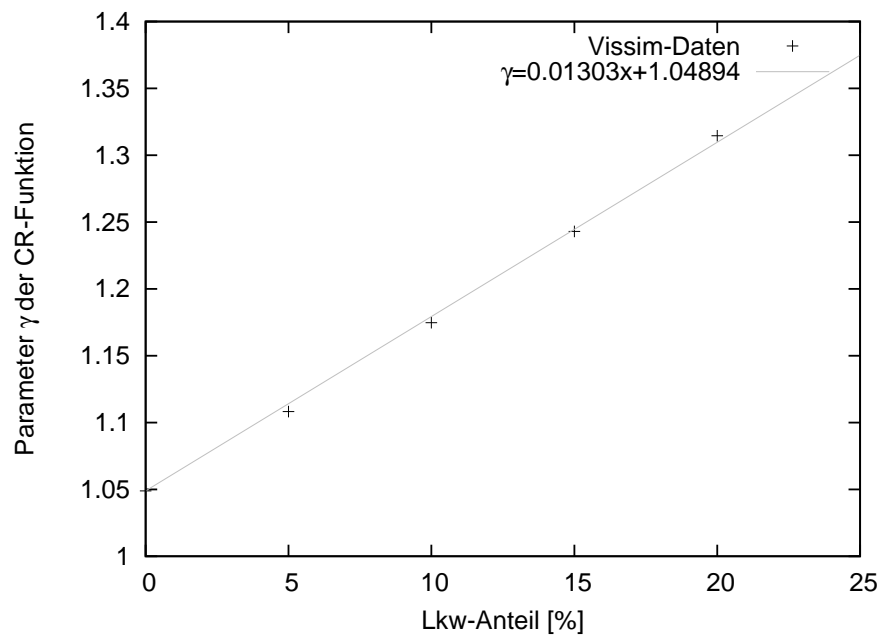


Abbildung C.3.: Funktionaler Zusammenhang für den Parameter γ

D. Funktionsparameter der CR-Funktion mit CACC-Effekten

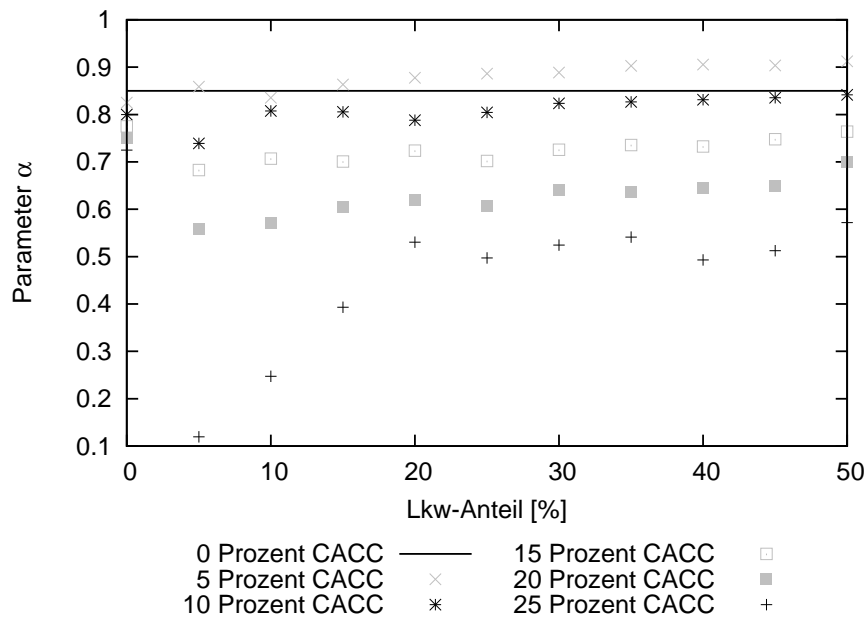


Abbildung D.1.: Variation des Parameter α bei unterschiedlichem CACC-Anteil

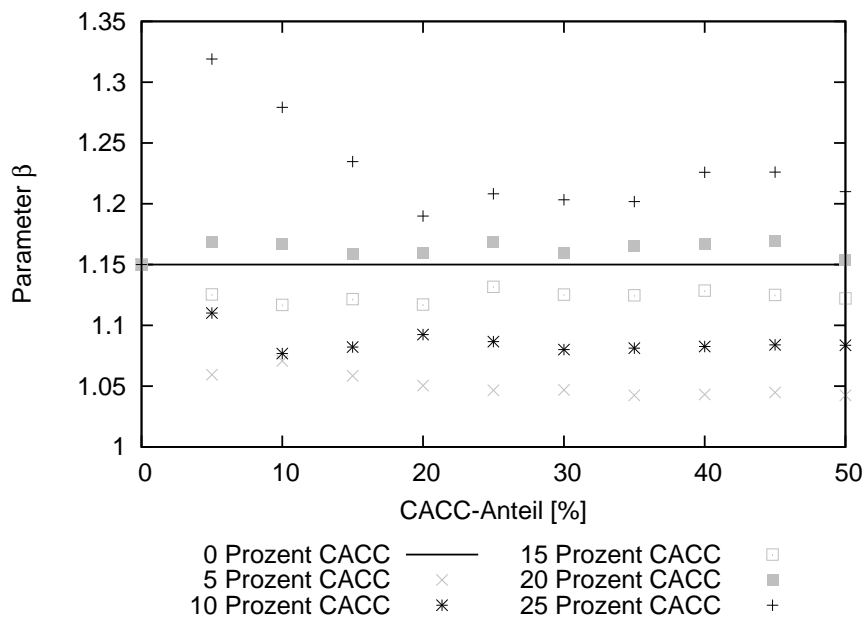


Abbildung D.2.: Variation des Parameter β bei unterschiedlichem CACC-Anteil

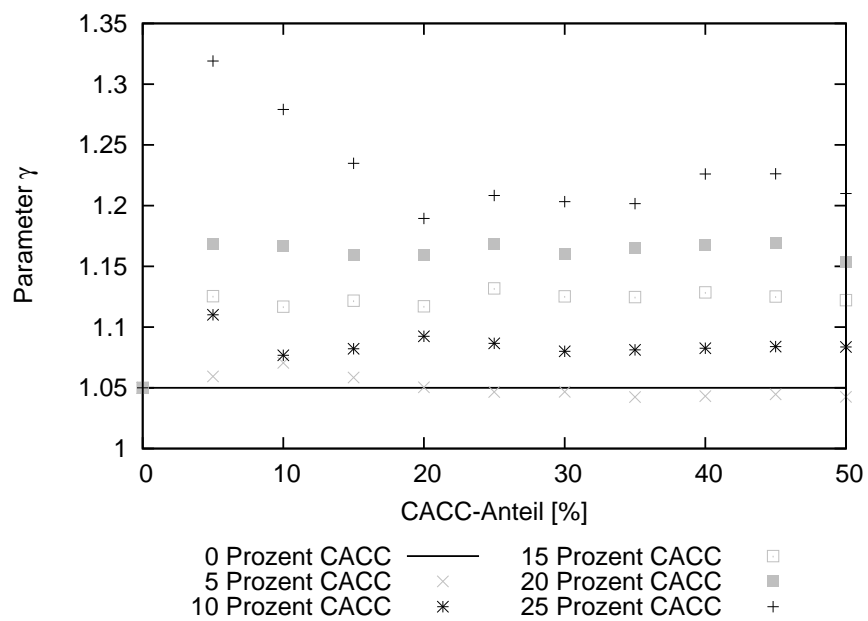


Abbildung D.3.: Variation des Parameter γ bei unterschiedlichem CACC-Anteil

Literaturverzeichnis

- [1] AREM, Bart v. ; DRIEL, Cornelia J. G. v. ; VISSER, Ruben: The Impact of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic-Flow Characteristics. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* No. 7 (2006), S. 429–436
- [2] BACH, Volker ; FOLLMANN, Jürgen ; BOSSERHOFF, Dietmar (Hrsg.): Verkehrssicherheit / Hessische Straßen- und Verkehrsverwaltung. Hessische Straßen- und Verkehrsverwaltung, 2006. – Forschungsbericht
- [3] BAST ; WIRTSCHAFTSVERLAG NW (Hrsg.): *Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen*. Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), 2002
- [4] BAST: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2006 / Referat V2. 2006. – Forschungsbericht
- [5] BAUMGARTEN, Helmut: *Das Beste in der Logistik – Innovationen, Strategien, Umsetzungen*. Springer, 2008 (ISBN 978-3-540-78404-3)
- [6] BENMIMOUN, Ahmed: Automatische Lkw-Konvois - Automatische Konvoifahrt – Eine Lösung für den drohenden Verkehrsinfarkt? / Institut für Kraftfahrwesen RWTH Aachen (IKA). 2006. – Forschungsbericht
- [7] BENZ, Th. ; DIEKMANN, Th. ; FISANOTTI, G. ; GEISSLER, T. ; HARKER, B. ; HERRMANN, R. ; LANFRANCO, Ch. Kanz G. Künzel C. ; MARTINI, S. ; MURDOCCO, V. ; BELLEZZA, M. ; MONTANARI, R. ; POYET, E. ; PUGLIA, V. ; SCHULZ, W. ; SCHULZE, M. ; STENMAN, A.: *Chauffeur 2 Final Report / PROMOTE-CHAUFFEUR 2 Consortium*. 2003. – Deliverable D24
- [8] BERNARD, Michael: Methoden und Techniken der Bemessung von Verkehr. In: *Schweizerische Verkehrswirtschaft* 235 (2004), S. 1–23. – ETH Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT)

- [9] BERUFGENOSSENSCHAFT FÜR TRANSPORT UND VERKEHRSWIRTSCHAFT: *Sicher. Für Dich. Für Mich.*
<http://www.fahrer-assistenz-systeme.de/index.php?id=62>. – letzter Zugriff am 06. Januar 2010
- [10] BODEN, Maik ; TREIBER, Martin: Nutzergleichgewicht oder Systemoptimum: Die systemoptimale Verkehrsumlegung in makroskopischen Verkehrsnetzen. In: *22. Verkehrswissenschaftlichen Tagen*, 2009
- [11] BOLTZE, Manfred ; KOHOUTEK, Sven ; WOLFERMANN, Axel: Eine verkehrstechnische Betrachtung des Value Pricing. In: *HEUREKA '08 – Optimierung in Verkehr und Transport*, 2008
- [12] BOLTZE, Manfred ; WOLFERMANN, Axel ; SCHÄFER, Petra K.: Leitfaden Verkehrstelematik: Hinweise zur Planung und Nutzung in Kommunen und Kreisen / Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen. 2005. – Forschungsbericht
- [13] BONNET, Christophe ; FRITZ, Hans: Fuel Consumption Reduction Experienced by Two PROMOTE-CHAUFFEUR Trucks in Electronic Towbar Operation. In: *7th World Congress Conference on ITS*, 2000
- [14] BRILON, Werner ; BRESSLER, Andrea: Traffic Flow on Freeway Upgrades. In: *TRB 2004 Annual Meeting*, 2004
- [15] BRILON, Werner ; DUNKER, Lothar ; HARKOPF, Gert ; KELLERMANN, Gerd ; LEMKE, Kerstin ; REICHARDT, Gabriele ; SCHNABEL, Werner ; FGSV VERLAG GMBH (Hrsg.): *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen*. FGSV, 2005 (ISBN 978-3-941790-35-3)
- [16] BRILON, Werner. ; GEISTEFELDT, Justin ; REGLER, Matthias: Reliability of Freeway Traffic Flow: A Stochastic Concept of Capacity. In: *Proceedings of the 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, 2005
- [17] BROWAND, Fred ; MCARTHUR, John ; RADOVICH, Charles: Fuel Saving Achieved in the Field Test of Two Tandem Trucks / University of Southern California. 2004. – California PATH Bericht
- [18] BUSCH, Fritz (Hrsg.) ; DINKEL, Alexander (Hrsg.) ; SCHIMANDL, Florian (Hrsg.) ; BOLTZE, Manfred (Hrsg.) ; JENTSCH, Heiko (Hrsg.): *Leitfaden für die Vernetzung*

-
- dynamischer Verkehrsbeeinflussungssysteme im zuständigkeitsübergreifenden Verkehrsmanagement*. Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), 2007
- [19] DAF: DAF-Adaptiver Tempomat- Für eine einfache und sichere Fahrt / DAF. 2009. – Produktinformation
- [20] DAIMLER: Telligent- Abstandsregeltempomat (ART) / Daimler. 2005. – Produktinformation
- [21] DAVIS, L. C.: Effect of Adaptive Cruise Control Systems on Mixed Traffic Flow Near an On-Ramp. In: *Physica A* Volume 379, Issue 1 (2007), S. 274–290
- [22] DEKRA (Hrsg.): *Verkehrssicherheitsreport Lkw 2009- Strategien zur Unfallvermeidung auf den Straßen Europas*. 2009
- [23] DEUTSCHE VERKEHRZEITUNG, (DVZ): Beschlossener Feldversuch spaltet die Geister. Version: 2011. <http://www.dvz.de/hintergrund/25m-lkw/einzelseite/id/beschlossener-feldversuch-spaltet-die-geister.html>. 2011. – Pressebericht
- [24] DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT, Institut für Verkehrssystemtechnik: (SUMO) Simulation of Urban Mobility. Version: 2010. http://sourceforge.net/apps/mediawiki/sumo/index.php?title=Main_Page. 2010. – Forschungsbericht
- [25] DEUTSCHLE, Stefan: Das KONVOI Projekt – Entwicklung und Untersuchung des Einsatzes von elektronisch gekoppelten Lkw-Konvois auf Autobahnen / Institut für Kraftfahrwesen Aachen. 2006. – Forschungsbericht
- [26] DRAGUTINOVIC, N. ; BROOKHUIS, Karel A. ; HAGENZIEKER, Marjan P. ; MARCHAU, Vincent A.: Behavioural Effects of Advanced Cruise Control Use – A Meta-Analytic Approach. In: *European Journal of Transport and Infrastructure Research* 4 (2005), S. 267–280
- [27] DUGGE, Birgit: *Ein simulatanes Erzeugungs-, Verteilungs-, Aufteilungs- und Routenwahlmodell*, Technische Universität Dresden, Fakultät für Verkehrswissenschaften "Friedrich List", Dissertation, 2006
- [28] EHLERT, Anett: *The Identification of some Requirements for an Improved Car Following Model*, University of Newcastle upon Tyne, Dissertation, 2004

- [29] ELLINGHAUS, Dieter (Hrsg.) ; STEINBRECHER, Jürgen (Hrsg.): *Lkw im Strassenverkehr - Eine Untersuchung über die Beziehungen zwischen Lkw- und Pkw-Fahrern*. Continental AG, 2002
- [30] EMMERMANN, Marco ; KIEFFER, Daniel F. J. ; RASPEL, Frank: Entwicklung anforderungsgerechter Telematik-Dienstleistungsprodukte. In: *Jahrbuch der Logistik* 2003 (2003), S. 104–107
- [31] ERATH, Alex ; FRÖHLICH, Philipp: Die Geschwindigkeiten im PW-Verkehr und die Leistungsfähigkeiten von Strassen über den Zeitraum 1950-2000 / ETH Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme. 2004. – Forschungsbericht
- [32] ERLEMANN, Kai: *Objektorientierte mikroskopische Verkehrsflusssimulation*, Ruhr-Universität Bochum, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Dissertation, 2007
- [33] EUROPEAN MONITORING CENTRE OF CHANGE: Trends and Drivers of Change in the EU Transport and Logistics Sector / European Foundation for the Improvement of Living and Working Conditions. 2008. – Bericht
- [34] FELLENDORF, Martin: Kalibrierung von VISSIM. In: *14. ptv vision Anwendertreffen*, 2004
- [35] FELLENDORF, Martin ; FRIEDRICH, Markus ; VORTISCH, Peter: Kopplung makroskopischer und mikroskopischer Verkehrsmodelle: Ein Verfahren für die Integration von großräumiger Planung und Detailplanung. In: *Tagungsband der 18. Verkehrswissenschaftlichen Tage*, 2001
- [36] FGSV (Hrsg.): *Das Fundamentaldiagramm - Grundlagen und Anwendungen*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2004
- [37] FILZEK, Björn: *Abstandsverhalten auf Autobahnen – Fahrer und ACC im Vergleich*, Technischen Universität Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau, Dissertation, 2002
- [38] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT KRAFTFAHRWESEN MBH AACHEN: Programmsystem zur Entwicklung längsdynamischer mikroskopischer Verkehrsprozesse in systemrelevanter Umgebung (PELOPS) / Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen. <http://www.pelops.de/>. – Forschungsbericht

- [39] FRANZ, Walter: Car-to-Car Communication – Anwendungen und aktuelle Forschungsprogramme in Europa, USA und Japan / DaimlerChrysler AG. 2004. – Forschungsbericht
- [40] FRIEDRICHS, Andreas ; HENNING, Klaus ; TILTMANN, Tom ; PETRY, Leonie: Entwicklung und Untersuchung von Fahrerassistenzsystemen für elektronisch gekoppelte Lkw-Konvois. In: *VDI-Berichte* 1960 (2006), S. 223–237
- [41] FRIEDRICHS, Andreas ; PETRY, Leonie ; SAVELSBERG, Eva: Kombinierte Fahr- und Verkehrsfluss-Simulation zur Untersuchung von elektronisch gekoppelten Lkw-Konvois. In: *VDI-Berichte* Nr. 1876 (2005), S. 79–100
- [42] GEHRING, Ottmar: *Automatische Längs- und Querführung einer Lastkraftwagenkolonne*, Universität Stuttgart, Fakultät Verfahrenstechnik und Technische Kybernetik, Dissertation, 2000
- [43] GEISTEFELDT, Justin: *Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit auf Autobahnen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen*, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswesen, Dissertation, 2007
- [44] GIANOPOULOS, George A.: Current European Research and Prospects in ICT in Freight Transport and Logistics. In: *European Conference on ICT for Transport Logistics*, 2008
- [45] GOLIAS, John ; YANNIS, George ; ANTONIOU, Constantinos: Classification of Driver-Assistance Systems According to their Impact on Road Safety and Traffic Efficiency. In: *Transport Reviews* 22 (2002), S. 179 – 196
- [46] GRINGMUTH, Christoph ; BATZ, Thomas ; MÜLLE, Jutta ; GEWEKE, Stefan ; CHLOND, Bastian: OVID- Stärkung der Selbstorganisationsfähigkeit im Verkehr durch I+K gestützte Dienste / Universität Karlsruhe, Institut für Wirtschaftspolitik und Wirtschaftsforschung. 2006. – Endbericht
- [47] GWEHENBERGER, Johann ; SCHWERTBERGER, Walter ; DASCHNER, Dieter: Wirkungspotenziale von Adaptive Cruise Control und Lane Guard System bei schweren Nutzfahrzeugen. In: *VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* 11 (2006), S. 1–14
- [48] HALBRITTER, Günter ; FLEISCHER, Torsten ; KUPSCH, Christel ; KLOAS, Jutta ; VOIGT, Ulrich: Nationale Innovationsstrategien für neue Techniken und Dienste zur

- Erreichung einer nachhaltigen Entwicklung im Verkehr im internationalen Vergleich / Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft. 2005. – Forschungsbericht
- [49] HAMPE, J. F. ; JUNG, Jürgen: Konzeption einer Architektur für ein Flottenmanagementsystem. In: *Arbeitsberichte des Instituts für Wirtschaftsinformatik Nr. 23*, Universität Koblenz-Landau and Instituts für Wirtschaftsinformatik, 2001
- [50] HASSO PLATTNER INSTITUT, (HPI): *Nationaler IT-Gipfel 2006: Arbeitsgruppe "Hightech-Strategie für die Informationsgesellschaft"*. 2006. – Stand: 28.08.2009
- [51] HEATCO: Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment / Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung. Version: August 2007.
<http://heatco.ier.uni-stuttgart.de/>. 2007. – Forschungsbericht
- [52] HELL, Walter: Zukunft der Mobilität- Szenarien für das Jahr 2020 / Institut für Mobilitätsforschung. 2002. – Forschungsbericht
- [53] HELLSTRÖM, Erik ; IVARSSON, Maria ; ÅSLUND, Jan ; NIELSEN, Lars: Look-Ahead Control for Heavy Trucks to Minimize Trip Time and Fuel Consumption. In: *Control Engineering Practice* 17 (2009), Nr. 2, S. 245–254. – ISSN 0967–0661
- [54] HENNING, Klaus ; PREUSCHOFF, Eva (Hrsg.): *Einsatzszenarien für Fahrerassistenzsysteme im Güterverkehr und deren Bewertung*. Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 531. VDI Verlag, 2003 (ISBN: 3183531127)
- [55] HENNING, Klaus ; WALLENTOWITZ, Henning ; ABEL, Dirk: Das Lkw-Konvoisystem aus den Perspektiven Informations-, Fahrzeug- und Automatisierungstechnik. In: *VDI-Berichte* 1971 (2007), S. 133–147
- [56] HOEDEMAEKER, M. ; BROOKHUIS, K. A.: Behavioural Adaptation to Driving with an Adaptive Cruise Control (ACC). In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 1 (1998), S. 95 – 106
- [57] HOYER, Robert: Verkehrssicherheit als Bestandteil einer dynamischen Navigation in Straßennetzen. In: *VWT19 Proceedings*, 2003

-
- [58] HÜSING, Bärbel ; BIERHALS, Rainer ; BÜHRLLEN, Bernhard ; FRIEDEWALD, Michael ; KIMPELER, Simone ; MENRAD, Klaus ; WENGEL, Jürgen ; ZIMMER, René ; ZOCHER, Peter: Technikakzeptanz und Nachfragemuster als Standortvorteil / Bundesministerium für Bildung und Forschung, Referat Z22. 2002. – Forschungsbericht
- [59] HYAMS, Daniel G.: *CurveExpert Basic 1.40*.
<http://www.curveexpert.net/products/curveexpert-basic/>. Version: 2010. – letzter Zugriff am 03.11.2010
- [60] IKA, RWTH AACHEN: Vorbereitende Maßnahmen für den praktischen Einsatz von Fahrerassistenzsystemen im Güterverkehr (MFG) / BMBF. 2004. – Forschungsbericht
- [61] IOANNOU, Petros A. ; CHIEN, C. C.: Autonomous Intelligent Cruise Control. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* Vol. 42, No. 4 (1993), S. 657–672
- [62] ITP ; BVU: Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025 / BMVBS. 2007. – Forschungsbericht
- [63] JASTRZEBSKI, Waclaw: Volume Delay Functions. In: *15th International EMME/2 Users' Group Conference*. Vancouver B.C., 2000
- [64] JASTRZEBSKI, Waclaw: A New Volume Delay Function. In: *21st International Emme Users' Conference*, 2007
- [65] KEMPER, Carsten: *Dynamische Simulation des Verkehrsablaufes unter Verwendung statischer Verflechtungsmatrizen*, Universität Hannover, Fakultät des Bauingenieurwesens und Geodäsie, Dissertation, 2006
- [66] KESTING, Arne: *Microscopic Modeling of Human and Automated Driving: Towards Traffic-Adaptive Cruise Control*, Technische Universität Dresden, Fakultät für Verkehrswissenschaften "Friedrich List", Dissertation, 2008
- [67] KÜHNE, Reinhart D. (Hrsg.): *Foundations of Traffic Flow Theory I: Greenshields' Legacy – Highway Traffic*. Berlin : Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Verkehrsstudien, 2008
- [68] KITTERER, Hartmut ; BREUER, Karsten ; ZIELKE, Frank ; SANDKÜHLER, Dirk: Rechnet sich ACC im Fernverkehrs-LKW? Eine Antwort. Und methodische Ansätze

- zu ihrer Überprüfung. In: *13. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2004*, 2004
- [69] KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN (Hrsg.): *Aktionsplan zur Einführung intelligenter Verkehrssysteme in Europa*. Brüssel, 2008
- [70] KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN (Hrsg.): *Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates für die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich ihrer allgemeinen Sicherheit*. Bd. KOM(2008) 316 endgültig. Brüssel : Kommission der Europäischen Gemeinschaften, 2008
- [71] KONSORTIUM simTD: *Sichere und intelligente Mobilität Testfeld Deutschland (SIM TD)*. www.simTD.de. Version: 2008. – letzter Zugriff am 06. Januar 2010
- [72] KRAFT, Volker ; BERNSMANN, Arnd ; SCHONEBOOM, Jens ; ZÄNKER, Klaus: *Konsequenzen von IuK-Technologien für die Logistikprozesse und für die Verkehrswirtschaft / IML and DSLV*. 2006. – Forschungsbericht
- [73] KRAUSS, Stefan: *Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics*, Universität zu Köln, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Dissertation, 1998
- [74] KRIEBERNEGG, Georg: *Inkrementelle Verkehrsnachfragemodellierung mit Verhaltensparametern der Verkehrsmittelwahl im Personenverkehr*, Technischen Universität Graz, Fakultät für Bauingenieurwissenschaften, Dissertation, 2005
- [75] KRIEGER, Winfried: *Strategische Ziele, Aufgabenfelder und Entwicklungsrichtungen der Telematik in Deutschland - gespiegelt an ausländischen Konzepten*. White Paper, Oktober 2004
- [76] LOHSE, Dieter ; LÄTSCH, Lothar: *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung*. 2. Auflage. Berlin : Verlag für Bauwesen, 1997
- [77] LOWNES, Nicholas E. ; MACHEMEHL, Randy B.: *Sensitivity of Simulated Capacity to VISSIM Driver Behavior Parameter Modification*. In: *TRB 2006 Annual Meeting*, 2006
- [78] LOWNES, Nicholas E. ; MACHEMEHL, Randy B.: *VISSIM: A Multi-Parameter Sensitivity Analysis*. In: *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*, 2006, S. 1406–1413

- [79] MAIBACH, Markus ; SCHREYER, Christoph ; SUTTER, Daniel ; ESSEN, Huib P. V. ; BOON, Bart H. ; SMOKERS, Richard ; SCHROTEN, Arno ; DOLL, Claus ; PAWLOWSKA, Barbara ; BAK, Monika: *Handbook on Estimation of External Costs in the Transport Sector Internalisation Measures and Policies for all External Cost of Transport (IMPACT)*. CE Delft, 2008 (Publication number: 07.4288.52)
- [80] MATTHES, Ulrike ; ROMMERSKIRCHEN, Stefan ; WEYAND, Emely: Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland bis 2050 / progtrans. 2007. – Forschungsbericht
- [81] MEHL, Horst: Mobilfunk-Technologien in der Verkehrstelematik. In: *Informatik-Spektrum 19*, 1996, S. S. 183–190
- [82] MILES, J.: Is this the way to do this? In: *Thinking Highways* (2009)
- [83] MITRETEK SYSTEMS (Hrsg.): *Intelligent Transportation Systems: Benefits, Costs, and Lessons Learned*. United States Department of Transportation, 2005 (Report Number: FHWA-OP-05-002)
- [84] ORTÚZAR, Juan de D. ; WILLUMSEN, Luis G.: *Modelling Transport*. Third Edition. John Wiley & Sons Inc., 2004 (ISBN-10: 0471965340)
- [85] PANWAI, Sakda ; DIA, Hussein: Comparative Evaluation of Microscopic Car-Following Behavior. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* VOL. 6, NO. 3 (2005), S. 314–325
- [86] PROGNOSE AG (Hrsg.): *Wirkungspotenziale der Verkehrstelematik zur Verbesserung der Verkehrsinfrastruktur- und Verkehrsmittelnutzung*. Basel : BMVBS, 2001
- [87] PTV (Hrsg.): *Telematik im neuem Licht. Hintergrundbericht*. Karlsruhe : PTV, 2006
- [88] PTV: *VISSIM 4.30 Benutzerhandbuch*. 4.30. Karlsruhe, 2007
- [89] PTV: *VISUM 11.00 Benutzerhandbuch*. 11.00. Karlsruhe, 2009
- [90] RADKE, Sabine ; DEUTSCHES INSTITUT FÜR WIRTSCHAFTSFORSCHUNG (Hrsg.): *Verkehr in Zahlen 2008/2009*. BMVBS, 2008 (ISBN-10: 387154390X)
- [91] RADKE, Sabine ; DEUTSCHES INSTITUT FÜR WIRTSCHAFTSFORSCHUNG (Hrsg.): *Verkehr in Zahlen 2009/2010*. BMVBS, 2010 (ISBN-10: 3871544078)

- [92] REITER, Uwe ; WIEDEMANN, Rainer: *Microscopic Traffic Simulation: The Simulation System MISSION*. 1991
- [93] RIECKENBERG, Thomas: *Telematik im Schienengüterverkehr- ein konzeptionell-technischer Beitrag zur Steigerung der Sicherheit und Effektivität*. Berlin, Technische Universität Berlin, Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme, Dissertation, 2004
- [94] ROHDE, Jannis: *Bildung von Gleichgewichtszuständen in Verkehrsnetzen nach Nutzer- oder Systemoptimum / Leibniz Universität Hannover, Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau*. 2006. – Forschungsbericht
- [95] RWTH AACHEN, Institut für Straßenwesen: *Einsatzszenarien für Fahrerassistenzsysteme im Güterverkehr (EFAS) / BMBF*. 2002 (Förderkennzeichen 19 G 1038). – Forschungsbericht
- [96] SABOUNGHI, Raouf L.: *Modeling The Impact of Intelligent Transportation Systems on Surface Goods Movement in Canada*, University of Manitoba, Department of Civil & Geological Engineering, Dissertation, 1997
- [97] SAVELSBERG, Eva: *Innovation in European Freight Transportation*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008 (ISBN 978-3-540-77301-6)
- [98] SCHICK, Peter: *Einfluss von Streckenbeeinflussungsanlagen auf die Kapazität von Autobahnabschnitten sowie die Stabilität des Verkehrsflusses*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Dissertation, 2003
- [99] SCHILLER, Christian: *Integration des ruhenden Verkehrs in die Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodellierung*. Dresden, Technische Universität Dresden, Fakultät für Verkehrswissenschaften "Friedrich List", Dissertation, 2004
- [100] SCHILLER, Christian: *Erweiterung der Verkehrsnachfragemodellierung um Aspekte der Raum- und Infrastrukturplanung*. Dresden, Technische Universität Dresden, Fakultät für Verkehrswissenschaften "Friedrich List", Habilitationsschrift, 2007
- [101] SEEBAUER, Petra ; HOMPEL, Michael t.: *Software in der Logistik: Markt-Spiegel*. München : Huss-Verlag, 2006 (ISBN-Nr. 3-937711-28-7)
- [102] SPIESS, Heinz: *Conical Volume-Delay Functions*. In: *Transportation Science* , Vol 24 Bd. Vol 24, 1990, S. 1–14

- [103] SUSSMAN, Joseph S.: *Perspectives on Intelligent Transportation Systems*. Massachusetts : Springer, 2005 (ISBN-10: 0387232575)
- [104] TANIGUCHI, Eiichi ; THOMPSON, Russell G. ; YAMADA, Tadashi ; DUIN, Ron v. ; EMERALD GROUP PUB (Hrsg.): *City Logistics: Network Modelling and Intelligent Transport Systems*. Pergamon, 2001 (ISBN-10: 0080439039)
- [105] TAPANI, Andreas: Vehicle Trajectory Impacts of Adaptive Cruise Control / Linköping University, Department of Science and Technology, The Institute of Technology. 2008. – Manuskript
- [106] THORPE, Chuck ; JOCHEM, Todd ; POMERLEAU, Dean: Automated Highways and the Free Agent Demonstration / University of Southern California. 1997. – California PATH Bericht
- [107] URS: Commercial Vehicle Operations. In: *Minnesota Statewide Regional ITS Architecture* Bd. Volume 5, Minnesota Department of Transportation, 2009
- [108] VAA, Truls ; GELAU, Christhard ; PENTTINEN, Merja ; SPYROPOLOU, Ioanna: ITS and Effects on Road Traffic Accidents - State of the Art. In: *ITS World Congress London* (2006)
- [109] VANDERSCHUREN, Marianne J. (Hrsg.): *The Benefits of Intelligent Transportation Systems: Modeling the Effects of Different ITS Systems*. Cape Town : The 22nd Southern African Transport Conference, 2003
- [110] VANDERWERF, Joel ; SHLADOVER, Steven E. ; MILLER, Mark A. ; KOURJANSKAIA, Natalia: Evaluation of the Effects of Adaptive Cruise Control Systems on Highway Traffic Flow Capacity and Implications for Deployment of Future Automated Systems / University of Southern California. 2002. – California PATH Bericht
- [111] VISSER, Ruben: *Co-operative Driving on Highways: An Assessment of the Impact of the Advanced Driver Assistance System 'Co-operative Adaptive Cruise Control' on Traffic Flow Using Microscopic Traffic Simulation*, University of Twente, Diplomarbeit, 2005
- [112] VOLVO (Hrsg.): *Produktinfo Adaptive Cruise Control. Version 3*. 2008
- [113] VOLVO: Eigenständig fahrende Automobile könnten schon in zehn Jahren Realität sein / Volvo Car Corporation. 2009. – Pressemitteilung

- [114] WAGENER, Norbert ; WAGNER, Ralf ; JAHN, Detlev ; LASCH, Rainer ; LEMKE, Arne: Der Transportmarkt im Wandel / Wagner & Herbst, Technische Universität Dresden, Deutsches Verkehrsforum. 2002. – Forschungsbericht
- [115] WALLENTOWITZ, Henning ; REIF, Konrad: *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen*. Vieweg+Teubner, 2006 (ISBN-10: 352803971X)
- [116] WANG, Zhong ; WALTON, C. M.: A Multi-Attribute Utility Theory Approach for ITS Planning. In: *Transport Research Board* (2008)
- [117] WERMUTH, Manfred: *Kontinuierliche Befragung des Wirtschaftsverkehrs in unterschiedlichen Siedlungsräumen – Phase 2, Hauptstudie (Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland – KiD 2002)*. Schlussbericht zum Projekt 70.0682/2001. Braunschweig, 2003
- [118] WINNER, Hermann ; HAKULI, Stephan ; WOLF, Gabriele (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. Vieweg+Teubner Verlag, 2009 (ISBN-10: 3834802875)
- [119] WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DES BMVBW: Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von Telematik im Verkehr. In: *Internationales Verkehrswesen* 55 (2003), S. 599–607
- [120] XU, Qing ; SENGUPTA, Raja: Simulation, Analysis, and Comparison of ACC and CACC in Highway Merging Control / University of Southern California. 2003. – California PATH Bericht
- [121] YOSHIMOTO, Ken-ichi ; KOKUBO, Tetsushi: *The Effect of Automatic Driving on Traffic Flow*. Department of Mechano-Informatics, University of Tokyo, 1997
- [122] YUN, Seongsoon ; WHITE, Wade W. ; LAMB, Daniel R. ; YONGQIANG, Wu: Accounting for the Impact of Heavy Truck Traffic in Volume-Delay Functions in Transportation Planning Models. In: *Transportation Research Record* 1931 (2005), S. 8–17
- [123] ZLOCKI, Adrian: Fahrerassistenzsysteme im Nutzfahrzeug / RWTH Aachen, Institut für Kraftfahrzeuge. 2006. – Forschungsbericht

- [124] ZLOCKI, Adrian (Hrsg.): *Serienentwicklung eines ACC- Systems (Adaptive Cruise Control) für Nutzfahrzeuge*. Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen, 2009