

# Ermittlung von Wirkungen kooperativer Assistenzsysteme im motorisierten Individualverkehr mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation – Methodik und Ergebnisse aus dem Projekt sim<sup>TD</sup>

Florian Schimandl, Mathias Baur und Fritz Busch

Kooperative Systeme zur Verbesserung von Verkehrseffizienz und Verkehrssicherheit sind Gegenstand aktueller praxisnaher Forschungsaktivitäten. Am Beispiel des Forschungsprojekts sim<sup>TD</sup> erläutern die Autoren ihren integrierten Ansatz zur Ermittlung der Wirkungen kooperativer Anwendungen auf den Gesamtverkehr. Sie zeigen, wie sie derartige Funktionen und zugrunde liegende Modelle sowie Szenarien in der Verkehrssimulation nachgebildet und untersucht haben. Grundlage dafür bilden Daten aus Fahrsimulatorstudien und der realen Versuchsumgebung. Mit der gewählten Methodik konnten gezielt und kontrolliert verschiedene Verkehrszustände, Ausstattungsraten von Fahrzeugen und sonstige vorgegebene Randbedingungen variiert werden. Anhand zweier exemplarisch ausgewählter Simulationsstudien werden die wichtigsten Einzelaspekte der Modellierung und Analyse konkret erläutert. Abschließend folgt eine Darstellung von Ergebnissen, die das positive Potenzial der betrachteten sim<sup>TD</sup>-Funktionen auf Basis ausgewählter Kenngrößen zeigt.

Many current research activities focus on the development and evaluation of cooperative intelligent transportation systems (C-ITS). Using the example of the sim<sup>TD</sup> project, the authors explain their integrated approach for the analysis of impacts of C-ITS on traffic efficiency and road safety. They present how they designed, validated and analyzed the applications as well as the related models and scenarios in the sim<sup>TD</sup> specific traffic simulation environment. Input data were extracted and processed from driving simulator studies and the real test environment. Using the presented methodology, the authors were able to vary different traffic demand settings, vehicle equipment rates and other influencing constraints. Based on two examples representing the sim<sup>TD</sup> traffic simulation study, the most important modelling and evaluation aspects are described in detail. Finally, some results are given that reflect the positive potential of the sim<sup>TD</sup> applications based on selected indicators.

Verfasseranschriften:  
Dipl.-Inf. F. Schimandl,  
florian.schimandl@tum.de,  
Dipl.-Inf. M. Baur,  
mathias.baur@tum.de,  
Prof. Dr.-Ing. F. Busch,  
fritz.busch@tum.de  
Lehrstuhl für Verkehrstechnik,  
Technische Universität  
München,  
Arcisstr. 21,  
80333 München

## 1 Einleitung

Die Verantwortlichen für Verkehrsmanagement und -sicherheit in Städten und auf Autobahnen setzen zukünftig zunehmend auf die Vernetzung von Fahrzeugen und der Infrastruktur. So lassen sich – bedingt durch die schnelle Informationsverbreitung mittels Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation – Hindernisse oder andere potenzielle Gefahren früher erkennen oder mittels Infrastruktur-zu-Fahrzeug-Kommunikation Fahrer individuell in ihrer Routenwahl beeinflussen.

Das „sprechende Auto“ wird immer wieder intensiv diskutiert und ist aktuell Gegenstand vieler Forschungsprojekte. Die reibungslose Einbindung solcher kommunizierender Fahrzeuge in die Verkehrs-

steuerung erfordert vermehrt ein entsprechendes kooperatives Umfeld – auch auf Infrastruktureseite. Bevor jedoch entsprechende Investitionen getätigt werden, ist zuerst der Nachweis einer verkehrlichen Wirksamkeit der einzelnen Systeme zu erbringen. Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, verschiedene verkehrlich wirksame Applikationen, die auf kooperativen Systemkomponenten aufbauen, nicht nur aus technischer Sicht, sondern auch hinsichtlich ihrer Wirkung auf Verkehrssicherheit, -effizienz oder Umweltwirkungen zu evaluieren. Hierbei steht für Infrastrukturbetreiber – im Gegensatz zur Automobilindustrie – nicht nur die Wirkung auf den einzelnen Verkehrsteilnehmer, sondern auf den Gesamtverkehr im Vordergrund.

Aufgrund begrenzter Ressourcen kann dieser Gesamtverkehrsaspekt aber nicht immer im Detail unter realen Bedingungen untersucht werden. Die Verwendung von Verkehrssimulationen kann diese Lücke bis zu einem gewissen Grad schließen und so eine wertvolle Ergänzung darstellen. Sie erlaubt zudem – anders als es im realen Umfeld der Fall ist –, gezielt vergleichbare Verkehrszustände und -situationen als Rahmenbedingung für die vergleichende Bewertung verkehrlicher Untersuchungen herzustellen. Darüber hinaus können auch bei hoher Verkehrsdichte noch große Anteile von Fahrzeugen mit entsprechender Funktionsausstattung am Gesamtverkehr simuliert werden. Am Beispiel des Forschungsprojekts sim<sup>TD</sup> (Sichere intelligente Mobilität – Testfeld

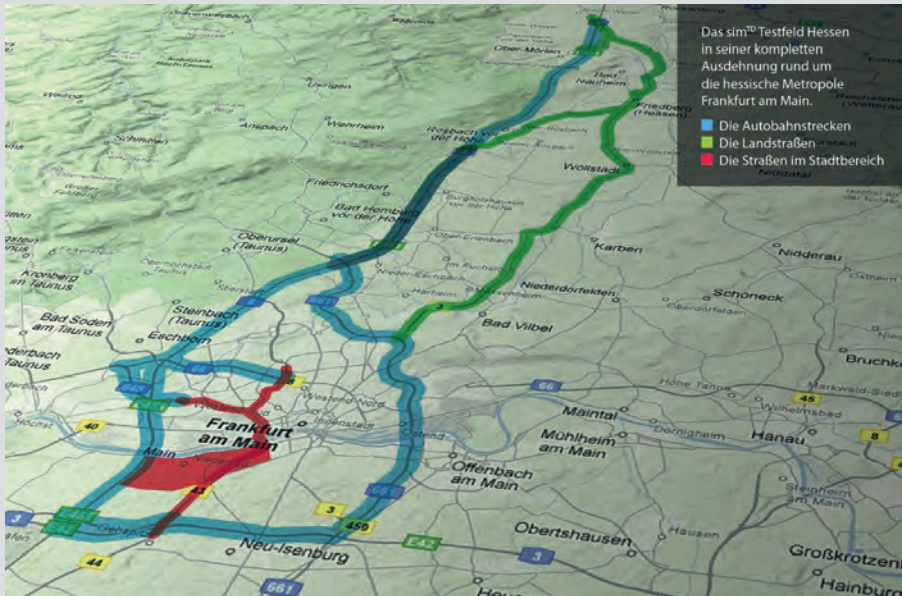


Bild 1: Das sim<sup>TD</sup>-Versuchsgebiet (Quelle: sim<sup>TD</sup>-Konsortium 2013)

Deutschland) erläutern die Autoren ihren auf Verkehrssimulationen basierten Ansatz zur verkehrlichen Wirkungsermittlung. Sie zeigen, wie sie im Projekt die reale Wirkweise von kooperativen Funktionen mithilfe von Modellen in der Simulation nachgebildet und validiert haben. Schließlich werden anhand zweier exemplarisch ausgewählter sim<sup>TD</sup>-Simulationsstudien die wichtigsten Einzelaspekte der Modellierung erläutert.

## 2 Das Projekt sim<sup>TD</sup>

In dem von den Bundesministerien für Wirtschaft, Forschung sowie Verkehr, Bau und Stadtentwicklung geförderten Projekt sim<sup>TD</sup> (siehe [www.simtd.de](http://www.simtd.de)) wurden verschiedene Anwendungen kooperativer Systeme im Verkehr (weiter-)entwickelt und in einem der weltweit größten Feldversuche im Zeitraum von sechs Monaten mit insgesamt 120 Fahrzeugen in der Realität und in einem aus Fahr- und Verkehrssimulation bestehenden Simulationslabor getestet. Das repräsentativ gewählte Versuchsgebiet im Raum Frankfurt am Main setzte sich hierbei aus dem Frankfurter Stadtteil Niederrad sowie aus Abschnitten der Autobahnen A 3, A 5, A 661 und der Bundesstraßen B 3 und B 455 zusammen (Bild 1).

Die insgesamt 33 Funktionen, die auf Fahrzeug-zu-Fahrzeug- oder Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation basieren, wurden sowohl aus technischer Sicht als auch hinsichtlich nicht-technischer Aspekte, d. h. bezüglich Nutzerorientierung

und verkehrlicher Wirksamkeit, untersucht. Letzteres erfolgte u. a. mittels eines integrierten Ansatzes zur Wirkungsermittlung, der in (Braun, Baur et al. 2011) und (Baur, Schimandl et al. 2012) detailliert beschrieben ist. Ein zentraler Bestandteil dieses Ansatzes ist die Extrapolation der Ergebnisse der Fahrsimulation und des Feldversuchs mithilfe mikroskopischer Verkehrssimulationen, sodass u. a. Aussagen zur Wirkung des kooperativen sim<sup>TD</sup>-Systems auf den Gesamtverkehr getroffen werden können. Ein Nachweis der Wirksamkeit einzelner Funktionen ist in (Schimandl, Baur et al. 2013) beschrieben. Die elf mittels Verkehrssimulation untersuchten Funktionen lassen sich in Warnfunktionen, Routenfunktionen und Lichtsignal-basierte Funktionen untergliedern. Warnfunktionen haben stets den Fokus auf Sicherheitsaspekten und sollen den Fahrer vorrangig im Außerortsbereich rechtzeitig im Vorlauf zu sicherheitskritischen Situationen informieren bzw. warnen. Beispiele hierfür sind die Funktionen „Hinderniswarnung“ oder „Stauendwarnung“.

Die Routenfunktionen haben stets die Effizienz des Verkehrsablaufs im Fokus. Hierbei sollen die Verkehrsteilnehmer basierend auf Verkehrslage- und Störungsinformationen unter den aktuell vorherrschenden (verkehrlichen) Bedingungen großräumig auf schnellstem Wege zum Ziel geführt werden. Beispiele sind die Funktionen „Umleitungsempfehlung“ und „Dynamische Routenplanung“.

Die Funktionen, die auf Lichtsignalanlagen basieren, haben im Innerortsbe-

reich den Fokus auf der Erhöhung der Verkehrseffizienz und -sicherheit an Knotenpunkten. Beispiele sind die Funktionen „Ampelphasenassistent“ oder die „Lokale verkehrabhängige Lichtsignalanlagensteuerung“.

Alle vorgenannten Funktionen wurden mittels eines generischen Ansatzes in der Verkehrssimulation nachgebildet und aus verkehrlicher Sicht detailliert ausgewertet.

## 3 Wirkungsermittlung für kooperative Systeme im Verkehr

Um die mögliche Wirkung der sim<sup>TD</sup>-Funktionen auf den Gesamtverkehr ermitteln zu können, wurde die in (Baur, Schimandl et al. 2012) beschriebene Methodik angewandt. Dazu wurde ein Simulationslabor aufgebaut (sim<sup>TD</sup>-Konsortium 2010). Im Fahrsimulator gewonnene Erkenntnisse zum Fahrverhalten mit und ohne entsprechendes System fließen als Parameter in die Verkehrssimulation ein (Bild 2) und beeinflussen die virtuellen sim<sup>TD</sup>-Fahrzeuge abhängig vom jeweiligen Ereignis. Unter Einbeziehung relevanter Modelle zur Nachbildung der Realität (Verkehrsmodell, Netzmodell, Kommunikationsmodell, Steuerungsverfahren) erlauben sie so eine Extrapolation auf den Gesamtverkehr.

Da kooperative Systeme per se ihre Wirkung nur durch das Zusammenspiel ihrer einzelnen Elemente entfalten können, ist für die Untersuchung eine wesentliche Randbedingung die jeweilige Durchdringung eines Systems mit kooperierenden Elementen. Sie wird durch die Ausstattungsrate beschrieben und stellt den prozentualen Anteil der mit dem kooperativen System ausgestatteten Fahrzeuge am Gesamtverkehr dar.

Werden in der weiteren Analyse nur die ermittelten Kenngrößen der ausgestatteten Fahrzeuge mit den nicht-ausgestatteten Fahrzeugen verglichen, so handelt es sich um einen reinen Gruppenvergleich innerhalb eines Szenarios. Wird dagegen die Wirkung auf den Gesamtverkehr unter festgelegten Randbedingungen (z. B. einer Ausstattungsrate von 20 %) betrachtet, so handelt es sich um einen Vergleich verschiedener Szenarien. In letzterem Fall fließen also auch die ermittelten Kenngrößen der nicht-ausgestatteten Fahrzeuge in eine Gesamtbewertung mit ein.

Zusätzlich zur Ausstattungsrate finden weitere Randbedingungen zur Abgrenzung



**SIEMENS**

[siemens.de/mobility](https://www.siemens.de/mobility)

# Grünes Licht für saubere Luft

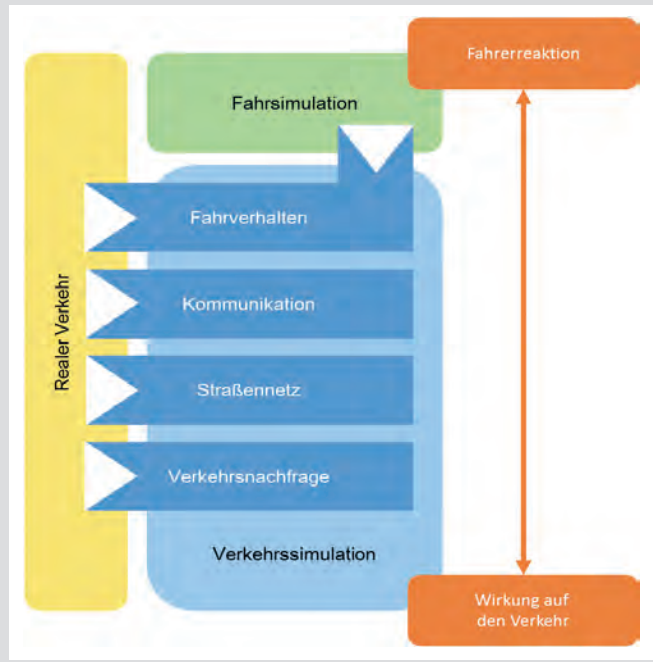
Die erste umweltorientierte Verkehrssteuerung  
Deutschlands dosiert den Zufluss und schafft grüne Wellen

Die Verkehrssteuerung in Potsdam richtet sich neuerdings neben der Verkehrsbelastung an der Lichtsignalanlage auch nach der Stickstoffdioxidbelastung. Ist sie im Stadtgebiet irgendwo zu hoch, so reagieren einzelne „Pfortnerampeln“ an kritischen Straßenabschnitten mit verlängerten Rotzeiten. Das verlangsamt den Zufluss und sorgt im Verbund mit weiteren umweltsensitiven Steuerungsmaßnahmen für schnelleres Durchkommen und sauberere Luft. Außerdem werden die Autofahrer auf Informations-

tafeln über die höhere Belastung und die geänderte Verkehrssteuerung informiert. Sinkt die Belastung wieder unter den Grenzwert, werden die Rotzeiten an den Pfortnerampeln aufs Normalmaß reduziert. Potsdam ist damit zu einem Vorreiter bei umweltorientierten Verkehrssteuerungen geworden und die neue Verkehrssystem-Managementzentrale (VSMZ) auf der Basis von Sitrtraffic® Scala ein wichtiges Instrument zur Umsetzung des Luftreinhalteplans der Stadt.

**Answers for infrastructure and cities.**

Bild 2: Zusammenspiel zwischen realem Verkehr und Simulationslabor



der einzelnen Szenarien Verwendung. Zur Untersuchung der verschiedenen  $sim^{TD}$ -Funktionen wurden beispielsweise – je nach Zielsetzung – Autobahn-, Bundesstraßen- oder innerörtliche Szenarien definiert, der Verkehrszustand („dicht“ oder „frei“) oder das Kommunikationsmedium (WLAN ITS-G5 oder Mobilfunk) variiert (Tabelle 1).

Die eigentliche Wirkung der Funktion wird dann auf Basis der Änderung festgelegter Kenngrößen unter „ceteris paribus“-Bedingungen (Variation genau eines Parameters in den Szenarien) bestimmt. In erster Linie wird hierbei die Veränderung – z. B. für Funktionen mit Fokus zur Erhöhung der Verkehrseffizienz – der Reisezeit oder der Anzahl der Halte analysiert.

#### 4 Modellierung und Verkehrssimulation im Projekt $sim^{TD}$

Mithilfe der Verkehrssimulation konnten gezielt und kontrolliert verschiedene

Verkehrszustände, Ausstattungsraten von  $sim^{TD}$ -Fahrzeugen oder auch Ausstattungsichten von straßenseitigen Sendestationen (ITS Roadside Stations, kurz IRS) skaliert werden. Es war also möglich, in verschiedenen Untersuchungen – unter sonst identischen Rahmenbedingungen – Unterschiede in der verkehrlichen Wirkung zu ermitteln (vgl. Abschnitt 3).

Die Verkehrssimulation liefert Aussagen über Wirkungen auf den Gesamtverkehr. Typische makroskopische Kenngrößen hierfür sind Verkehrsdichte, Verkehrsstärke, mittlere Geschwindigkeiten oder mittlere Reisezeiten. Im  $sim^{TD}$ -Simulationslabor kam die mikroskopische Verkehrssimulationssoftware VISSIM<sup>1</sup> zum Einsatz. Für die  $sim^{TD}$ -Verkehrssimulation wurde ein strukturiertes Vorgehen zur Implementierung, Kalibrierung und Validierung der zugrunde liegenden Komponenten und Modelle konzipiert. Bild 3 zeigt das Vorgehen schematisch.

Ausgangspunkt waren dabei folgende Informationen:

Tabelle 1: Beispielhafte Szenariodefinition in der  $sim^{TD}$ -Verkehrssimulation

Szenario	Netzausschnitt	Verkehrszustand	Ausstattungsrate $sim^{TD}$ -Fahrzeuge	Ausstattung Infrastruktur	Übertragungsmedium	Sonstige Randbedingungen
1	A 661	dicht	0 %	keine	ITS-G5	Nicht einsehbares Stauende
2	A 661	dicht	20 %	keine	ITS-G5	Nicht einsehbares Stauende
3	A 661	dicht	20 %	3 Road Side Stations	ITS-G5	Nicht einsehbares Stauende
...	...	...	...	...	...	...

- Digitale Karten und zusätzliche Infrastrukturdaten aus dem Versuchsgebiet
- Messungen von Induktionsschleifen auf den ausgewählten Autobahnen im Versuchsgebiet
- Spezifikationen der  $sim^{TD}$ -Funktionen in Fahrzeugen, Roadside Stations und der Verkehrszentrale zur Anbindung an die Verkehrssimulation
- Ergebnisse der Fahrsimulatorstudien zur Modellierung des Fahrverhaltens in der Verkehrssimulation
- Auswertungskonzept zur Analyse der Wirkungen der  $sim^{TD}$ -Funktionen auf den Gesamtverkehr.

Verschiedene Datensätze aus diesen Quellen wurden dann iterativ zur Kalibrierung und Validierung verwendet, bis eine geeignete Abbildung der entsprechenden Gegebenheiten in der Realität angenommen werden konnte. In den folgenden Abschnitten ist näher beschrieben, wie eine solche geeignete Abbildung definiert war. Anschließend konnte statistisch ermittelt werden, welche Anzahl an Simulationsläufen für die einzelnen Szenarien notwendig war. Am Beispiel der Funktion „Umleitungsmanagement“ wird eine solche Berechnung dargestellt.

#### 4.1 Modellierung des Fahrverhaltens

Eine grundlegende Annahme bei der Wirkungsanalyse kooperativer Funktionen besteht darin, dass Fahrer, die eine Warnung oder Information durch das System erhalten, in einer spezifischen Form darauf reagieren. Typischerweise besteht eine wirkrelevante Reaktion in einer Änderung der Längsbeschleunigung oder einem Fahrstreifenwechsel. Die Ausprägungen dieser Reaktionen konnten im  $sim^{TD}$ -Fahrsimulator untersucht werden (siehe  $sim^{TD}$ -Konsortium 2010). Die Ergebnisse der umfassenden Fahrsimulatorstudien bestanden aus Zeitreihen und deskriptiven Ausgaben zu fahrbezogenen Daten, wie z. B. zeitdiskrete Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte sowie der aktuell befahrene Fahrstreifen der einzelnen Fahrer. Diese Werte wurden im Rahmen eines Modellierungsprozesses statistisch aggregiert und anschließend als Verteilungen für Wunschgeschwindigkeiten und Fahrstreifenwechselwünsche in die Verkehrssimulation eingespielt.

Bild 4 zeigt beispielhaft zwei Wunschgeschwindigkeitsverteilungen, die sich als Reaktion auf ein Stauende für Fahrer ohne

<sup>1</sup> VISSIM Version 5.40, PTV Vision Traffic Suite

die  $sim^{TD}$ -Funktion „Stauendewarnung“ (blaue Kurve) bzw. als Reaktion auf eine frühzeitige Warnung vor dem Stauende für Fahrer mit aktivierter Funktion (rote Kurve) einstellen. Der Prozess und die Ergebnisse der Fahrverhaltensmodellierung sind detailliert in (Hoffmann 2013) beschrieben.

#### 4.2 Automatisierte Generierung von Simulationsnetzen aus einer Geo-Datenbank

Für die Untersuchungen in der Verkehrssimulation wurde das  $sim^{TD}$ -Versuchsgebiet in Form von VISSIM-Netzmodellen abgebildet. Dies ermöglichte es, streckenbezogene Gegebenheiten bestimmter Netzausschnitte, auf denen  $sim^{TD}$ -Versuche gefahren wurden, realitätsnah und damit hinsichtlich der geographischen Randbedingungen und auch der zugrunde liegenden Verkehrsnachfrage gut vergleichbar auch in der Verkehrssimulation darzustellen.

Digitale Kartendaten sowie spezifische Informationen zur Verkehrsinfrastruktur wurden in einer Geo-Datenbank zusammengefasst. Es wurde zudem ein passender Export-Mechanismus spezifiziert und implementiert, der (Teil-)Netze des Versuchsgebiets im VISSIM-Datenformat vollautomatisch aus den Geo-Informationen der Datenbank generieren kann. Entsprechend der Anforderungen der Untersuchungen spezifischer Anwendungen wurden geeignete Ausschnitte aus diesem Gesamtnetz ausgewählt.

Bild 5 zeigt die Netzgeometrie des  $sim^{TD}$ -Versuchsgebiets, die in der Geo-Datenbank abgelegt ist. In Teilbild 1 ist eine Kartenansicht des realen Netzes dargestellt, Teilbild 2 zeigt das entsprechend generierte VISSIM-Netz. Ein detailliert modellierter innerstädtischer Straßenzug entlang der Stresemannallee zwischen Friedensbrücke und Kennedyallee in Frankfurt-Niederrad ist dabei in einer Zoomansicht (Teilbild 4 real, Teilbild 3 Simulation) hervorgehoben. Teilbild 5 zeigt eine Netzmasche bestehend aus drei Autobahnabschnitten im Westen von Frankfurt in der Detailsicht.

#### 4.3 Kalibrierung und Validierung der Verkehrsnachfrage

In den beschriebenen Netzausschnitten wurde die Verkehrsnachfrage so definiert, dass eine sinnvolle Verkehrssituation zur realistischen Simulation der jeweiligen

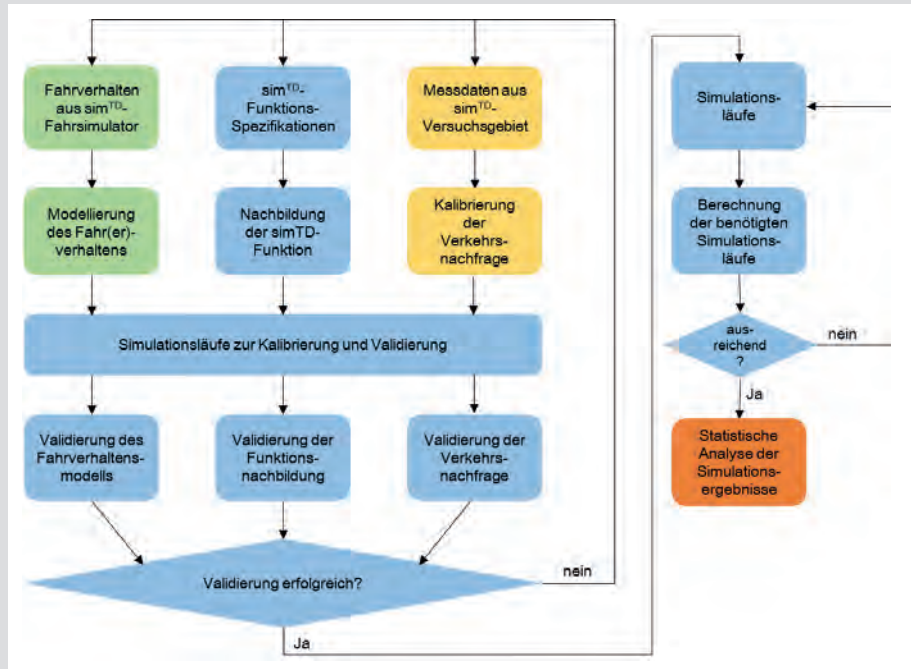


Bild 3: Ablauf der Modellbildung und -kalibrierung in den  $sim^{TD}$ -Simulationsstudien

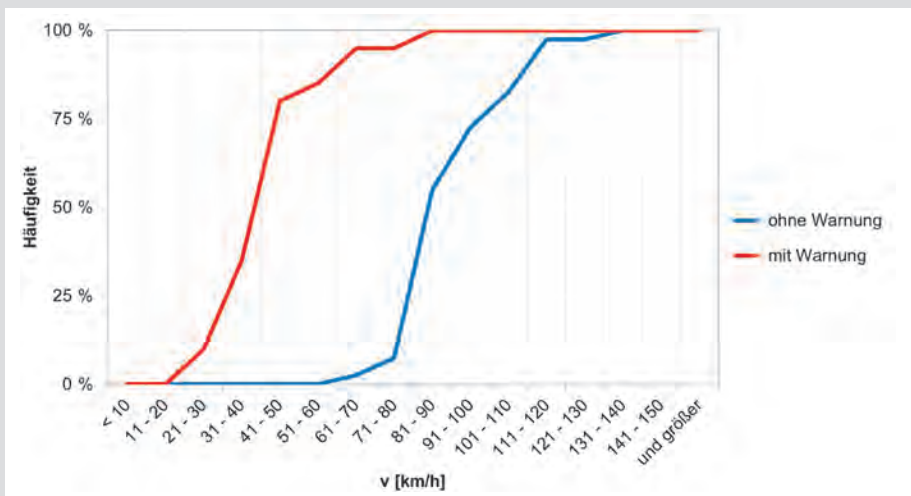


Bild 4: Wunschgeschwindigkeitsverteilungen mit/ohne Stauendewarnung aus Fahrsimulatorstudie

Funktion entsteht. Hierzu wurden reale induktivschleifenbasierte Detektor-Messdaten der betroffenen Strecken im Versuchsgebiet mithilfe der Geo-Datenbank analysiert. Diese wurden in Form von Fahrzeugzuflüssen und einer VISUM<sup>2</sup>-Umlegung in das Netzmodell der Simulation integriert. Zusätzlich erfolgte eine ma-

nuelle Feinkalibrierung der entstandenen Abbiegerelationen mittels Messdaten. Die makroskopische Validierung der Verkehrsnachfrage diente als Nachweis für die Übertragbarkeit der Simulationsergebnisse auf die reale Umgebung. Hierzu wurden

<sup>2</sup> VISUM Version 11.0, PTV Vision Traffic Suite



Bild 5: Darstellung des sim<sup>TD</sup>-Versuchsgebiets in der Geo-Datenbank und VISSIM

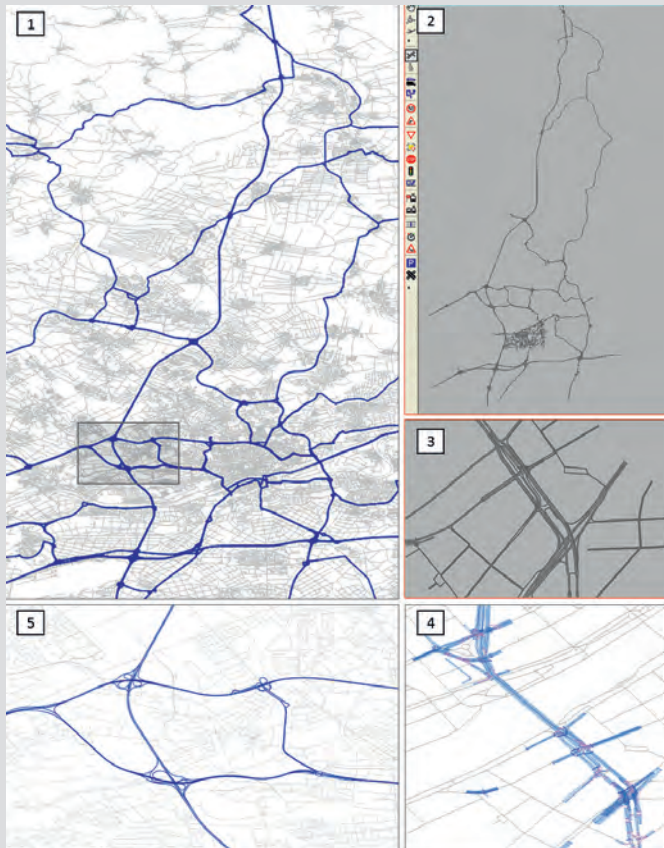
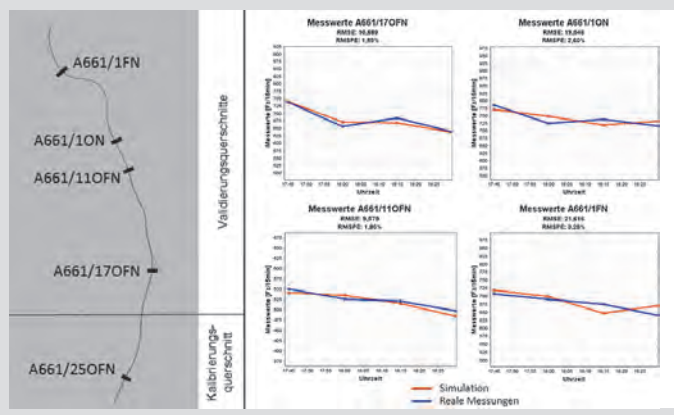


Bild 6: Ausgewählte Messquerschnitte auf der A 661 in Süd-Nord-Richtung sowie Gegenüberstellung von realen und simulierten Messwerten aus der Validierungsphase



weitere Messquerschnitte aus dem relevanten Streckenabschnitt ausgewählt, die nicht bereits zur Kalibrierung verwendet wurden.

Bild 6 zeigt fünf Messquerschnitte, die auf dem Streckenabschnitt der Autobahn A 661 in Süd-Nord-Richtung liegen und für eine repräsentative makroskopische Validierung ausgewählt wurden. Der maßgebende Detektor für die Kalibrierung des Hauptzuflusses liegt ganz im Süden; diejenigen für die makroskopische Validierung nördlich davon.

Es wurden fünf Simulationsläufe mit der eingestellten Verkehrsnachfrage durchgeführt und anschließend für die Messquerschnitte die gemessenen Werte aus der Simulation mit den Messdaten aus den

realen Messungen für den gewählten Zeitraum mittels der Wurzel der prozentualen mittleren quadratischen Abweichung (Root Mean Square Percentage Error – RMSPE) verglichen.

Der Abgleich der realen Messdaten mit den Simulationsergebnissen ergibt, dass der RMSPE-Wert am Querschnitt mit der größten Abweichung bei 3,28 % liegt. Für Werte unter 5 % kann gemäß (FGSV 2006) eine sehr gute Übereinstimmung angenommen werden.

#### 4.4 Erweiterte Modellierung der Nachrichtenübertragung

Zur realitätsnahen Untersuchung von verkehrlichen Wirkungen verschiedener An-

wendungen mit Kommunikation zwischen Fahrzeugen oder zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur ist es notwendig, die wesentlichen Aspekte der Nachrichtenübertragung in ihren direkten oder indirekten Wirkungen auf das Fahrverhalten der simulierten Fahrzeuge abzubilden. Hierzu wird die Übertragung von Informationen zwischen Fahrzeugen und zwischen der Infrastruktur und Fahrzeugen modelliert.

Das verwendete Modell (VCOM, Vehicular Communication) stellt auf Grundlage von validierten Untersuchungen aus geeigneten Kommunikations-Simulatoren Wahrscheinlichkeitsfunktionen für den Empfang von Nachrichtepaketen mittels Funktechnologien nach dem Kommunikationsstandard ITS-G5 (ETSI 2009) zur Verfügung. Eine solche Wahrscheinlichkeitsfunktion kann für ein Fahrzeug abschätzen, ob es zuvor ausgesandte Datenpakete empfängt. Parameter sind die Entfernung zwischen Sender und Empfänger sowie die aktuell vorherrschende Verkehrsdichte in dem für die Kommunikation relevanten Bereich. Das Modell ist in (Killat, Schmid-Eisenlohr et al. 2007) beschrieben.

Im Rahmen von sim<sup>TD</sup> fand eine Erweiterung dieses Modells statt. Unter anderem wurden die Modellparameter auf die in sim<sup>TD</sup> relevanten Gegebenheiten angepasst sowie eine Berücksichtigung von Sichtbeziehungen im innerstädtischen Bereich implementiert. Es ist seither möglich, neben der Nachbildung einer Datenübertragung über den Funkstandard ITS-G5, auch Annahmen zur Übertragungsverzögerung bei Mobilfunknutzung (UMTS) zu treffen.

Über die Erweiterung des VCOM-Modells hinaus fand die Konzeption des neuartigen Modells VINFO statt. Es dient der realitätsgetreuen Verbreitung von Informationen auf Basis der Übertragung von Nachrichten ohne explizite Modellierung der Kommunikation. Dabei werden statistische Annahmen zur Verzögerung getroffen, die zwischen Versand und Empfang mehrerer Nachrichten entsteht. Einzelnen Fahrzeugen werden dabei großräumig verfügbare Informationen, z. B. über die Verkehrslage, zugewiesen. So kann mit hoher Laufzeiteffizienz in Simulationen eine große Menge gültiger Informationen übertragen werden, ohne dass die Aspekte der eigentlichen Kommunikationstechnologien berücksichtigt werden müssen. Dies ermöglicht beispielsweise die Simulation von Alternativroutensteuerungen in einem großen Simulationsnetz mit einer

großen Anzahl kommunizierender Fahrzeuge.

Eine detaillierte Beschreibung der aktuellen und zukünftigen Modellierung, Parametrierung und Validierung des erweiterten VCOM- sowie VINFO-Modells findet sich in (Gaugel 2011).

#### 4.5 Varianzanalysen – Statistik für den Szenarienvergleich

Um aussagekräftige Ergebnisse aus den Vergleichsstudien in der Verkehrssimulation erzeugen zu können, waren umfangreiche statistische Analysen zwischen den Ergebnissen der einzelnen Simulationsstudien zu den verschiedenen Szenarien notwendig.

Grundsätzlich wurde zwischen Vergleichen mit zwei Gruppen innerhalb eines Szenarios, also dem Vergleich aller Fahrzeuge mit aktivem  $\text{sim}^{\text{TD}}$ -System gegenüber allen Fahrzeugen ohne  $\text{sim}^{\text{TD}}$ -System und dem Vergleich zwischen verschiedenen Szenarien und Ausstattungsraten unterschieden (vgl. Abschnitt 3). Auf Grundlage von Verteilungs- und Homogenitätstests wurden geeignete Varianzanalyse-Tests verwendet, um Mittelwerte der aggregierten Fahrzeugwerte aus der Simulation miteinander zu vergleichen und Unterschiede auf Signifikanz hin zu überprüfen.

#### 5 Simulationsstudie

In der Verkehrssimulation wurden insgesamt elf  $\text{sim}^{\text{TD}}$ -Funktionen untersucht. In den folgenden Abschnitten wird eine exemplarische Simulationsstudie anhand zweier repräsentativer, unterschiedlich wirkender Funktionen beschrieben: Einerseits die Simulation zur  $\text{sim}^{\text{TD}}$ -Stauendwarnung als Repräsentant der Warnfunktionen mit angestrebter Sicherheitswirkung, andererseits das  $\text{sim}^{\text{TD}}$ -Umleitungsmanagement als Vertreter der Funktionen, die mithilfe von Routenempfehlungen ein Systemoptimum hinsichtlich der Reisezeiten auf allen möglichen Alternativrouten durch Optimierung einer großräumigen Netz-Verkehrslage ermöglichen sollen.

##### 5.1 Die Funktion „Stauendwarnung“ in der $\text{sim}^{\text{TD}}$ -Verkehrssimulation

Die Funktion „Stauendwarnung“ wurde im Rahmen von  $\text{sim}^{\text{TD}}$  entwickelt und in der Verkehrssimulation auf Grundlage der Spezifikationen und Implementierungen der Komponenten im Realsystem ( $\text{sim}^{\text{TD}}$ -

Fahrzeuge, Roadside Stations) nachgebildet. Der Ablauf und die Komponenten sind in ( $\text{sim}^{\text{TD}}$ -Konsortium 2009) folgendermaßen beschrieben:

„Stauinformationen aus unterschiedlichen Quellen (Schleifen, FCD, einzelnes Fahrprofil) werden empfangen, zusammengeführt und plausibilisiert. Der Fahrer wird in Abhängigkeit von seiner gefahrenen Geschwindigkeit rechtzeitig gewarnt, wenn das Stauende auf seinem Weg liegt. Der Stau muss zuvor entweder lokal in einem einzigen Fahrzeug durch Verwendung von Detektionsalgorithmen erkannt werden oder bei entsprechend hoher Ausrüstungsdichte aus den kommunizierten Geschwindigkeits-

daten der vorausfahrenden Fahrzeuge abgeleitet werden. Auch Stauinformation aus Schleifendaten kann genutzt werden.

Der Fahrer wird rechtzeitig vor Stauenden gewarnt, auf welche er sich zubewegt. Die momentane Geschwindigkeit und die Entfernung zum Stau bestimmt die Kritikalität der Warnung.“

Die Nachbildung orientiert sich an der funktionalen Wirkweise der Funktion, die auf eine Veränderung des Fahrverhaltens des zu warnenden Fahrers abzielt. Konkret bedeutet dies, dass Komponenten der Funktion spezifisch für die Verkehrssimulation implementiert wurden, die die folgenden Parameter beeinflussen:

## Ankündigung



### Deutscher Straßen- und Verkehrskongress 2014

vom 30. September bis 2. Oktober 2014 in Stuttgart

mit begleitender Fachausstellung „Straßen und Verkehr 2014“



„Deutscher Straßen- und Verkehrskongress 2014“ der  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV)  
mit der Fachausstellung „Straßen und Verkehr 2014“

vom 30. September bis 2. Oktober 2014  
im ICS – Internationales Congresscenter Stuttgart

Kongress in den Räumen C1.1 und C1.2  
Ausstellung in den Räumen C2, Foyer,  
Messepiazza



Forschungsgesellschaft für Straßen-  
und Verkehrswesen e. V. (FGSV)  
An Lyskirchen 14 – 50676 Köln  
Telefon: 0221 / 93 58 3-0 – Fax: 93 58 3-73  
E-Mail: koeln@fgsv.de – Internet: www.fgsv.de



FGSV Verlag GmbH  
Wesseling Str. 17 – 50999 Köln  
Telefon: 0 22 36 / 38 46 30 – Fax: 38 46 40  
E-Mail: info@fgsv-verlag.de  
Internet: www.fgsv-verlag.de

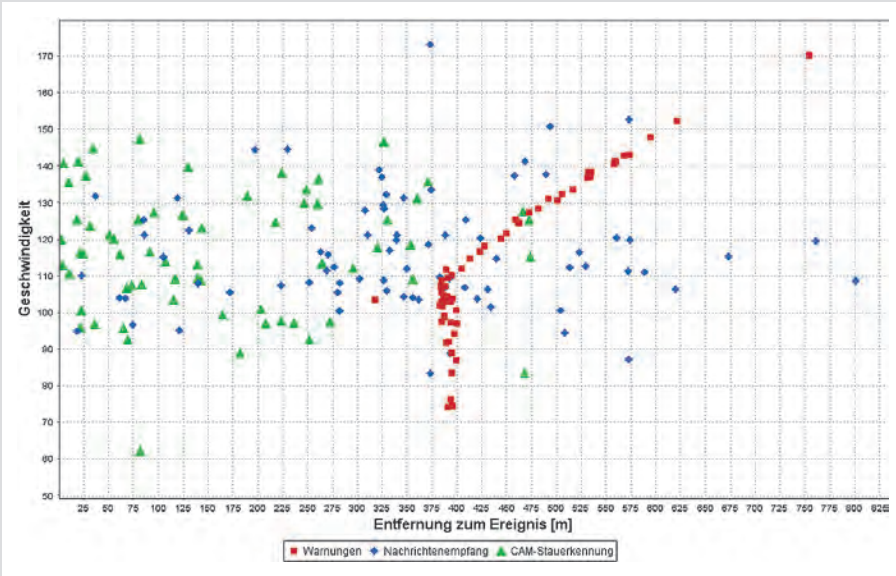


Bild 7: Nachrichtempfang und virtuelle Warnungen in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit

- Die Generierung und der Versandzeitpunkt einer virtuellen Nachricht an andere Fahrzeuge auf Basis einer Stauererkennung.
- Die Erzeugung von virtuellen Stauende-Ereignissen aus empfangenen virtuellen Stauende-Nachrichten und der Auswertung der Ergebnisse der „kooperativen Stauendeerkennung“.
- Der Zeitpunkt einer virtuellen Warnungs- oder Informationsanzeige für den Fahrer auf dem sim<sup>TD</sup>-Bildschirm bei Fahrzeugen, die ein Stauende-Ereignis identifiziert haben.
- Die Dauer und der Inhalt einer entsprechenden virtuellen Warnungs- oder Informationsanzeige.

Im Anschluss wurde eine Verifikation der Funktionsnachbildung durchgeführt.

Bild 7 zeigt dazu das Ergebnis des Funktionsalgorithmus in der Verkehrssimulation: In einem Stau-Testszenario melden sim<sup>TD</sup>-Fahrzeuge auf Basis der Stauererkennungsfunktion Stauende-Ereignisse. Aus der Darstellung ist zu erkennen, in welcher relativen Entfernung zum Ereignis (hier: das Stauende) die virtuellen Nachrichten und Warnungen in Abhängigkeit von ihrer gefahrenen Geschwindigkeit in den sim<sup>TD</sup>-Fahrzeugen eintreffen. Das entsprechende Szenario wurde für diese Verifikation zwei Minuten lang simuliert; die Frequenz des Nachrichtenversands betrug zehn Hertz. Es zeigte sich, dass die resultierenden Systemausgaben in der Verkehrssimulation genau denjenigen entsprechen, die für die Funktion in der Realität spezifiziert wurden.

Bild 9: Streckennetz des gewählten Netzausschnitts, ©OpenStreet-Map contributors (links)

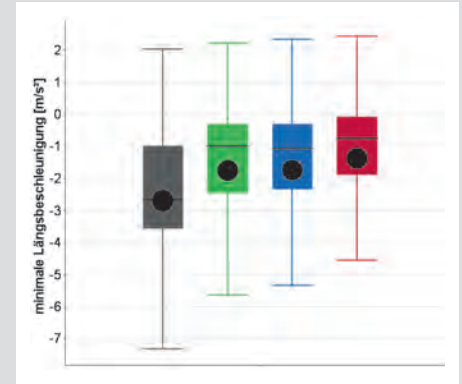
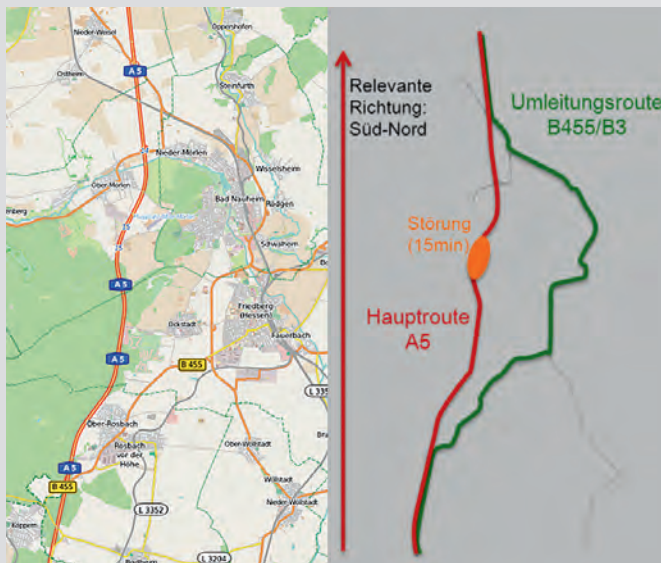


Bild 8: Box-Plot Minimale Längsbeschleunigung mit vier verschiedenen Ausstattungs-raten: 0 % (grau), 20 % (grün), 50 % (blau), 80 % (rot). Schwarzer horizontaler Balken: Median, Schwarzer Punkt: Mittelwert, Box: 50 %-Quantil.

Die simulierten Szenarien ergaben sich aus der Variation der Ausstattungsrate von sim<sup>TD</sup>-Fahrzeugen sowie der Anzahl der verwendeten ITS Roadside Stations. Zur Simulation der Funktion „Stauendewarnung“ wurde ein Abschnitt der Autobahn A 661 als Teilnetz des Versuchsgebiets verwendet.

Zusammenfassend zeigen sich bei reiner Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation positive, signifikante Effekte auf den gesamten Verkehr, verglichen mit dem Nullfall (ohne sim<sup>TD</sup>). Die Abstände zwischen den Fahrzeugen vergrößern sich, die Fahrzeuge müssen weniger stark bremsen (Bild 8). Die Geschwindigkeiten in der kritischen Stausituation sind für alle Fahrzeuge geringer und damit der Situation angepasst. Die Reaktion der ausgestatteten Fahrzeuge beeinflusst den gesamten Verkehr positiv. Mit steigender Ausstattung erhöht sich die positive Wirkung.

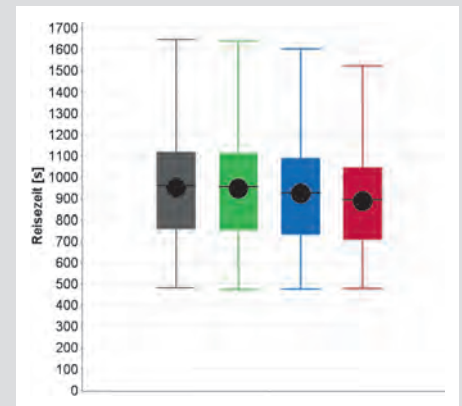


Bild 10: Box-Plot Mittlere Reisezeit mit vier verschiedenen Ausstattungs-raten: 0 % (grau), 20 % (grün), 50 % (blau), 80 % (rot) – alle Routen. Schwarzer horizontaler Balken: Median, Schwarzer Punkt: Mittelwert, Box: 50 %-Quantil.



## 5.2 Die Funktion „Umleitungsmanagement“ in der sim<sup>TD</sup>-Verkehrssimulation

Der Ablauf und die Komponenten der Funktion Umleitungsmanagement sind in (sim<sup>TD</sup>-Konsortium 2009) folgendermaßen beschrieben:

„Der Fahrer wird bei Störungen auf der Hauptroute über Alternativrouten im Netz informiert, mit denen er eine geringere Reisezeit erreichen kann. In der Verkehrszentrale werden Störungen im Straßennetz identifiziert und entsprechende Strategien für das Umleitungsmanagement aktiviert. Die verfügbare Kapazität der Alternativrouten wird auf der Grundlage der Daten zur Gesamtverkehrslage sowie unter Berücksichtigung der identifizierten Verkehrseignisse geprüft. Umleitungsempfehlungen werden an die Fahrzeuge gesendet. Die Umleitungsempfehlung wird hinsichtlich ihrer Relevanz für die Fahrtroute des jeweiligen Fahrzeugs geprüft und an den Fahrer weitergegeben.“

Eine Nachbildung der entsprechenden Komponenten erfolgte analog zur Stauendwarnung.

Für die Simulation von Alternativroutensteuerungen in der sim<sup>TD</sup>-Verkehrssimulation wurde ein Netzausschnitt gewählt, der eine Hauptroute auf der Autobahn und eine Alternativroute über parallel verlaufende Bundesstraßen enthält (Bild 9). Dieser umfasst einen Abschnitt der Autobahn A 5 sowie den östlich parallel verlaufenden Abschnitt der Bundesstraßen B 455 und B 3.

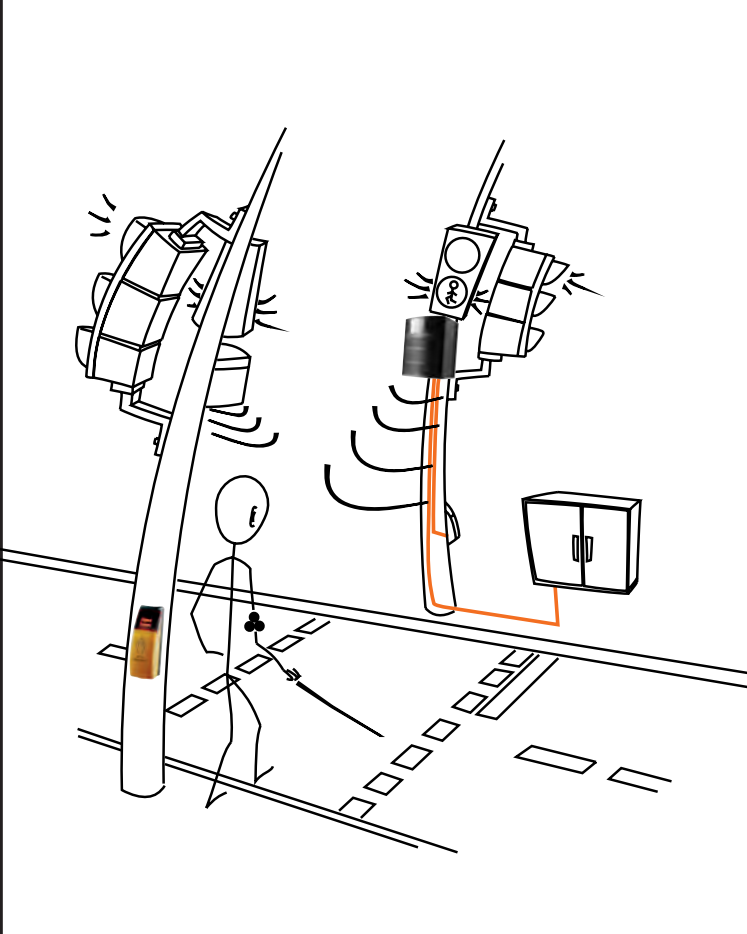
Auf der Autobahn A 5 wurde als gezielt eingestelltes Testszenario in Süd-Nord-Richtung eine 15-minütige Störung (erzwungene Geschwindigkeitsreduktion aller Fahrzeuge auf 5 km/h aufgrund einer virtuellen Gefahrenstelle, siehe Bild 9 rechts) zum Übergang eines dichten in einen gestauten Verkehrszustand modelliert. Als Kommunikationsmedium wurde ITS-G5 gewählt. Der einzige zu variiere Parameter ist die Ausstattungsrate (0 %, 20 %, 50 %, 80 %).

Anhand von fünf vorausgehenden Simulationsläufen wurde die Varianz der Ergebnisse für relevante Kenngrößen ermittelt. In Abhängigkeit vom gewünschten Signifikanzniveau und der Genauig-

keit kann so die für die statistische Auswertung benötigte Anzahl von Simulationsdurchläufen mithilfe einer iterativen Berechnung abgeschätzt werden (FGSV 2006). Das angestrebte Konfidenzniveau wurde mit 95 % zur Erzeugung einer angemessenen Genauigkeit festgelegt.

Die Berechnungen ergaben, dass für die Simulation der Funktion „Umleitungsempfehlung“ zehn Simulationsdurchläufe ausreichend waren, um ein genügend schmales Konfidenzintervall um den Erwartungswert der jeweiligen Kenngrößen gewährleisten zu können.

In den Simulationsergebnissen hat sich gezeigt, dass im Mittel für den Gesamtverkehr eine signifikante Verminderung der Reisezeiten durch höhere Anteile von sim<sup>TD</sup>-Fahrzeugen am Gesamtverkehr erzielt werden konnte. Dies ist in Bild 10 ersichtlich. Insbesondere die Hauptroute kann von einer besseren Verteilung der Fahrzeuge profitieren, da sich der Rückstau hinter der Störung nicht so stark ausbreitet, wenn mehr Fahrzeuge vorzeitig abgeleitet werden.



**Geschätzte**  
 ??? . ??? . ???

**Millionen Euro können in der Verkehrstechnik gespart werden.**

Die einfache RTB-Formel zur Optimierung von Altanlagen:

**Taster + Akustik + net.1**  
 = behindertengerechte Nachrüstung ohne aufwendige Erdarbeiten.

**Danke, dass Sie uns wertschätzen.**

**RTB**

RTB GmbH & Co. KG | Tel. 05252 9706-0 | [www.rtb-bl.de](http://www.rtb-bl.de)

## 6 Fazit und Ausblick

Es hat sich gezeigt, dass die Verkehrssimulation ein unverzichtbares Hilfsmittel zur Ermittlung der Wirkungen von kooperativen Fahrerassistenzsystemen auf den Gesamtverkehr darstellt. Die Verwendung von Fahrsimulatorergebnissen zur Modellierung des Fahrverhaltens sowie die Generierung und Validierung der verwendeten Modelle auf Basis von Realdaten haben sich als zielführend erwiesen. Es konnten so umfassende und auf die Realität übertragbare Erkenntnisse gewonnen werden.

Die Analysen haben gezeigt, dass beispielsweise Reisezeiten durch die Funktion „Umleitungsempfehlung“ signifikant reduziert werden können. Mit zentralenseitiger Unterstützung ist es möglich, ein Systemoptimum zu erreichen, was belegt, dass auch kollektive Funktionen im kooperativen Umfeld sinnvoll einsetzbar sind. Des Weiteren trägt die Funktion „Stauendewarnung“ dazu bei, die Bremsintensität zu vermindern und die Annäherung an potenziell gefährliche Stausituationen harmonischer und sicherer zu gestalten. Auch bei den übrigen Funktionen zeigt sich ein positives Bild. Das sim<sup>TD</sup>-System ist in der Lage, das Fahrverhalten einzelner Fahrer so zu beeinflussen, dass bei sicherheitsrelevanten Funktionen frühzeitig und daher weniger intensiv gebremst wird. Bei den lichtsignalbasierten Funktionen zeigt sich im Zusammenspiel mit den im Untersuchungsgebiet eingesetzten Steuerungsverfahren ein Potenzial zur Verringerung der Anzahl der Halte am Knotenpunkt und somit die Möglichkeit, sowohl Durchfahrtszeiten als auch Lärm- und Schadstoffemissionen lokal zu reduzieren.

Insgesamt betrachtet sind positive Effekte durch den Einsatz des sim<sup>TD</sup>-Systems zu erkennen, wobei die Ausprägung der einzelnen Wirkungen oft sehr unterschiedlich, im Hinblick auf Sicherheit und Effizienz oft auch gegenläufig ist – eine Verbesserung der Sicherheit kann durchaus zu Verschlechterungen der verkehrlichen Effizienz führen. Vor einer weiteren Interpretation der Ergebnisse muss daher immer klar abgegrenzt werden, welche Wirkung durch den Einsatz eines solchen Systems erreicht werden soll.

Aufgrund der Breite der Untersuchungen sind einige Detailfragen offengeblieben, für die sich auf Basis der umfangreichen Datengrundlage zukünftig weitere Analysen anbieten. Unter anderem ist die gezielte Untersuchung der Systemwirkungen eines kombinierten Einsatzes mehrerer oder aller Funktionen in einem größeren Einsatzgebiet mit unterschiedlichen Ausstattungs- und Kombinationsvarianten offengeblieben. Dies muss vorerst weiteren Studien überlassen bleiben. Diese aus Sicht der Markteinführung wichtigen Anschluss-Untersuchungen werden dann aber in der Lage sein, zusätzlich auch erste Erfahrungen aus dem beginnenden Praxiseinsatz der sim<sup>TD</sup>-Technologie (unter anderem im Rahmen des 2015 startenden EURO-Korridors Rotterdam-Wien) mit einfließen zu lassen.

### Literaturverzeichnis

Baur, M.; Schimandl, F.; Gabloner, S.; Margreiter, M.; Hoffmann, S. (2012): An integrated approach to the traffic efficiency impact evaluation of cooperative systems in FOTs and traffic simulation. 19<sup>th</sup> ITS World Congress, Wien, 22.-26. Oktober 2012.

Braun, R.; Baur, M.; Müller, J.; Schimandl, F.; Hoffmann, S.; Fullerton, M.; Busch, F. (2011): Strategy to determine the ef-

fects of cooperative systems on traffic safety and efficiency. 8<sup>th</sup> ITS European Congress, Lyon, 2011.

ETSI (2009): European profile standard for the physical and medium access control layer of intelligent transport systems operating in the 5 GHz frequency band, final draft ETSI ES 202 663 v1.1.0, November 2009.

FGSV (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen) (2006): Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation – Grundlagen und Anwendung, FGSV Verlag, Köln, 2006.

Gaugel, T. (2011): Bericht zur Analyse und Umsetzung des erweiterten Kommunikationsmoduls für die sim<sup>TD</sup>-Verkehrssimulation, 2011, interner Bericht.

Gomes, G.; May, A.; Horowitz, R. (2004): Calibration of VISSIM for a Congested Freeway, Transportation Research Record 1876, TRB, National Research Council, Washington D. C., 2004.

Hoffmann, S. (2013): Mikroskopische Modellierung und Bewertung von verkehrssicherheitskritischen Situationen, Dissertation, Technische Universität München, 2013.

Killat, M.; Schmid-Eisenlohr, F.; Hartenstein, H.; Rössel, C.; Vortisch, P.; Assenmacher, S.; Busch, F. (2007): Enabling efficient and accurate large-scale simulations of VANETS for vehicular traffic management. 4th ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET), Montreal, 2007.

Schimandl, F.; Baur, M.; Hoffmann, S.; Gabloner, S.; Margreiter, M. (2013): Effects of Cooperative Systems on Traffic Safety and Efficiency – Results of the German sim<sup>TD</sup>-Project. mobil.TUM 2013, International Scientific Conference on Mobility and Transport.

sim<sup>TD</sup>-Konsortium (2009): Beschreibung der C2X-Funktionen, sim<sup>TD</sup> Deliverable D11.1, 2009.

sim<sup>TD</sup>-Konsortium (2010): Versuchsplan 1.0, sim<sup>TD</sup> Deliverable D41.1, 2010.

„Mit diesem Teil 2 wird der Beitrag abgeschlossen, dessen Teil 1 im Heft 5/2014 dieser Zeitschrift erschienen ist.“



Walter Durth  
Horst Hanke

**Handbuch  
Straßenwinterdienst**

KIRSCHBAUM

**Handbuch Straßenwinterdienst**  
Prof. Dr.-Ing. Walter Durth  
Dr.-Ing. Horst Hanke  
Hardcover, 380 Seiten  
mit vielen Fotos und Grafiken  
Format 17 x 24 cm, 64,- Euro  
ISBN 978-3-7812-1616-7

Das Handbuch Straßenwinterdienst behandelt aus Sicht der Wissenschaft und der Praxis die Organisation und Durchführung des Winterdienstes auf Verkehrsflächen außerorts wie innerorts. Das in 15 Kapitel gegliederte Werk, inklusive Rechtsgrundlagen, ist mit vielen farbigen Abbildungen ausgestattet.