

Deliverable D5.5

TP5-Abschlussbericht – Teil A

Version	1.0
Verbreitung	Öffentlich
Projektkoordination	Daimler AG
Versionsdatum	30.06.2013



sim^{TD} wird gefördert und unterstützt durch

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung

Dieses Dokument wurde erstellt auf Basis der sim^{TD}-FactSheets, welche von verschiedenen sim^{TD}-Partnern verfasst wurden.

Diese Beiträge wurden hier wiederverwendet und redaktionell bearbeitet von
Dr. Stefan Gläser – Volkswagen AG

Projektkoordination
Dr. Christian Weiß
Daimler AG
HPC 050 – X430
71059 Sindelfingen
Germany

Telefon +49 7031 90 47118
Fax +49 711 3052154999
E-Mail christian.a.weiss@daimler.com

Das sim^{TD}-Konsortium übernimmt keinerlei Haftung in Bezug auf die veröffentlichten Deliverables. Änderungen sind ohne Ankündigung möglich. © Copyright 2013 sim^{TD}-Konsortium.

The sim^{TD} consortium will not be liable for any use of the published deliverables. Contents are subject to change without notice. © Copyright 2013 sim^{TD} consortium.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1 sim ^{TD} : Einzigartig und erfolgreich	3
1.1 ITS Roadside Station (IRS)	3
1.2 ITS Central Station (ICS)	5
1.3 Beispiel Hinderniswarnung	8
1.4 Beispiel Elektronisches Bremslicht	8
1.5 Beispiel Ampelphasenassistent	9
1.6 Verkehrssimulation	9
2 Car-to-X bereit für den Markt	13
2.1 Technologie besteht Reifeprüfung	13
2.2 Volkswirtschaftliche Relevanz wurde belegt	21
2.3 Fahrer wollen Car-to-X Funktionen nutzen	23
2.3.1 Beispiel Hinderniswarnung	24
2.3.2 Kaufbereitschaft	24
2.4 sim ^{TD} unterstützt Markteinführung kooperativer Systeme	25
2.4.1 Hybride Kommunikation	26
2.4.2 Rahmenbedingungen	26
2.4.3 Ausbau von Lichtsignalanlagen (LSA)	28
2.4.4 Einsatzfahrzeugwarnung	28
2.4.5 Baustellenwarnung	28
2.4.6 Car-to-X Markteinführung im Cooperative ITS Corridor Rotterdam – Frankfurt am Main – Wien	29
Literaturverzeichnis	31

Teil B-1A GIDAS Wirkfeldanalyse

1. Methodik und Simulation
2. Elektronisches Bremslicht
3. Querverkehrsassistent
4. Warnung bei Nichtbeachtung von Verkehrszeichen

Teil B-1B Volkswirtschaftliche Bewertung

1. Verkehrssicherheitswirkungen
2. Elektronisches Bremslicht
3. Querverkehrsassistent
4. Warnung bei Nichtbeachtung von Verkehrszeichen
5. Dynamisierung der Nutzenberechnung
6. Verkehrssicherheitsnutzen durch Car-to-X Systeme
7. Verkehrseffizienz
8. Kosten für Fahrzeugausstattung und Infrastruktur
9. Gesamtergebnisse

Teil B-2 Nutzerakzeptanz, IT-Sicherheit, Datenschutz und Schutz der Privatsphäre

1. Einleitung
2. Prüfung der forschungsleitenden Hypothesen zur Akzeptanz
3. Bewertung der Nutzerakzeptanz in der Fahrsimulation
4. Bewertung der Nutzerakzeptanz im Feldversuch
5. Bewertung der IT-Sicherheit und Schutz der Privatsphäre im Feldversuch durch die Versuchsfahrer
6. Einordnung Datenschutz und Schutz der Privatsphäre auf Basis der Versuchsergebnisse
7. Anmerkungen zur Einführung eines sim^{TD}-Systems

Teil B-3 Technische Bewertung des sim^{TD}-Feldversuches

1. Allgemeines
2. Funktionsspezifische Bewertung
3. Funktionsübergreifende Bewertung
4. Kernfragen zur Bewertung Technik
5. Forschungsleitende Hypothesen für Technik
6. Fazit

Teil B-4 Ökonomische Analyse

1. Einordnung und Überblick
2. Konzeptionelle Grundlagen und grundsätzliche Herausforderungen
3. sim^{TD}-Einführungsszenarien: Entwurf und ökonomische Bewertung
4. Schlussfolgerungen
5. Anhang: Kommunikationsstrategie
6. Anhang: Stakeholderanalyse
7. Anhang: Fallstudien (TMC, TMCpro, Dash Express)
8. Anhang: Bestands- und Alternativsysteme
9. Anhang: Liste der sim^{TD}-Funktionen

Teil B-5 Rechtliche Rahmenbedingungen

1. Anhang
 - I. Kartellrechtliche Anforderungen
 - II. Schutz der Forschungsergebnisse gegenüber Dritten
 - III. Haftung im Zusammenhang mit After Sales Produkten
 - IV. Weitere Hinweise zur Haftungsvermeidung
 - V. Ergänzende Ausführungen zum Datenschutz
 - VI. Ausführungen zur ISO 26262

Abbildungen

Abbildung 1: Platzierung der IRS an einer Verkehrszeichenbrücke	3
Abbildung 2: Platzierung von CCU und Antennen auf Verkehrszeichenbrücke.....	4
Abbildung 3: Zusammenspiel der Versuche in sim ^{TD}	7
Abbildung 4: Darstellung der Informationsausbreitung der Stauendewarnung auf der Autobahn A5 im sim ^{TD} -Versuchsgebiet in der sim ^{TD} -Verkehrssimulation.....	10
Abbildung 5: Gemessene Reichweite auf einer geraden Landstraße im Wald und ihr Einfluss auf die sim ^{TD} -Funktion „Hinderniswarnung“	14
Abbildung 6: Gemessene Reichweite auf einer geraden Straße in der Stadt und ihr Einfluss auf die sim ^{TD} -Funktion „Hinderniswarnung“	15
Abbildung 7: Gemessene Reichweite in einer Kurve auf einer Landstraße im Wald und ihr Einfluss auf die sim ^{TD} -Funktion „Hinderniswarnung“	16
Abbildung 8: Gemessene Reichweite auf einer Kreuzung in der Stadt und ihr Einfluss auf die sim ^{TD} -Funktion „Querverkehrsassistent“	16
Abbildung 9: Georeferenzierte Verteilung „PacketServiceNetworkType“ für die Mobilfunktechnologien EDGE, UMTS und HSDPA während des sim ^{TD} -Feldversuches im November 2012.....	18
Abbildung 10: Prozentuale Verteilung des Empfangspegels [dBm], hier am Beispiel vom November 2012.....	19
Abbildung 11: Messergebnisse über alle Messungen und alle verwendeten Mobilfunktechnologien (HSDPA, WCDMA, EGPRS)	19
Abbildung 12: Tageszeitverteilung der gemessenen Datenübertragungszeiten im städtischen Bereich des Versuchsgebietes.	20
Abbildung 13: Volkswirtschaftliche Kosten von Straßenverkehrsunfällen von insgesamt 30 Milliarden Euro im Jahr 2015 und das Potenzial der sim ^{TD} -Funktionen.	22
Abbildung 14: Abschätzung der Entwicklung der Car-to-X Feldausstattung über Zeit nach Jahren der Einführung.....	27

Zusammenfassung

Dieses Dokument fasst die Ergebnisse des sim^{TD}-Projektes in Form von Kernaussagen zusammen. Diese Kernaussagen finden sich auch wieder in den sim^{TD}-FactSheets. Sie sind gemeinsam von den Projektpartnern erstellt worden. Dies geschah auf Basis der Bewertung der TP4-Auswertedokumente durch TP5.

SIM^{TD}: EINZIGARTIG UND ERFOLGREICH!

1. In dem bislang größten Feldversuch zur Car-to-X Kommunikation wurde erstmals mit dem DRIVE Center eine kooperative Verkehrszentrale aufgebaut. Diese war mit den Verkehrszentralen des Landes Hessen und der Stadt Frankfurt am Main über eine standardisierte Schnittstelle vernetzt und kommunizierte über mehr als 100 ITS Roadside Stations (IRS) mittels Car-to-X Technologie mit 120 Fahrzeugen.
2. In 41.000 Stunden wurden von 500 Teilnehmern mit 120 Fahrzeugen, darunter mehrere Motorräder, 1.650.000 Kilometer gefahren – ein einzigartiger Feldversuch.
3. Die anwendungsbezogene Überprüfung der Car-to-X Technologie auf der Straße erfolgte durch kontrollierte Fahrversuche. Die Organisation zur Durchführung und Betreuung der Versuche ist vom Personaleinsatz her vergleichbar mit einem kleinen mittelständischen Unternehmen.
4. In Ergänzung zum Feldversuch wurde eine eigenständige Simulationsumgebung, bestehend aus Fahrsimulation und Verkehrssimulation, aufgebaut. Die Erkenntnisse aus den Simulationen wurden mit den Ergebnissen des Feldversuchs zu einer Gesamtbewertung der Zukunftstechnologie Car-to-X zusammengeführt.
5. In der Fahrsimulation konnte gezeigt werden, dass durch die sim^{TD}-Funktionen das Geschwindigkeits- und Abstandsverhalten der Fahrer positiv beeinflusst wird, so dass Fahrsicherheit und Fahreffizienz erhöht werden.
6. In den Verkehrssimulationen konnte das Potential von sim^{TD}-Funktionen bei verschiedenen Ausstattungsgraden in einem virtuellen Abbild des Versuchsgebietes nachgewiesen werden.

CAR-TO-X BEREIT FÜR DEN MARKT!

Technologie besteht Reifeprüfung!

7. Die Car-to-X Technologie konnte unter Alltagsbedingungen ihre Tauglichkeit zeigen, die zugrundeliegenden Konzepte wurden bestätigt.
8. Der hybride Systemansatz hat sich bestätigt, WLAN-basierte Kommunikation und Kommunikation über Mobilfunk wurden erfolgreich im Feld getestet.
9. Ein wesentlicher Vorteil der Car-to-X Technologie, die Kommunikation bei verdeckten Szenarien, z. B. der Blick um die Ecke einer Kreuzung oder durch ein Lastfahrzeug hindurch, hat sich im Feldversuch bestätigt.
10. Die Anwendung der Car-to-X Kommunikation zur Übermittlung von Informationen aus den Fahrzeugen in die Verkehrszentralen und umgekehrt führte zu einer verbesserten Kenntnis der Verkehrslage und zu einer schnelleren Erkennung verkehrsrelevanter Ereignisse.

Volkswirtschaftliche Relevanz wurde belegt!

11. Bei vollständiger Durchdringung mit Car-to-X Funktionen könnten jährlich bis zu 6,5 Milliarden Euro der volkswirtschaftlichen Kosten von Straßenverkehrsunfällen vermieden werden. Des Weiteren kann ein volkswirtschaftlicher Nutzen von 4,9

Milliarden Euro durch die Reduzierung von Stautunden und die Vermeidung von Umweltbelastungen erzielt werden.

Fahrer wollen sim^{TD} nutzen!

12. Die Fahrerbefragung im Feldversuch dokumentiert den Wunsch der Fahrer, Car-to-X Funktionen nach Markteinführung zu nutzen. Dabei steht insbesondere ein wahrnehmbarer Mehrwert im Vergleich zu bestehenden Technologien bzw. Services im Vordergrund.
13. Bereits heute wäre ein Großteil der Probanden bereit, durch anonymisierte Bereitstellung von Fahrzeugdaten zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und -effizienz beizutragen.

sim^{TD} unterstützt Markteinführung kooperativer Systeme!

14. Die Ergebnisse aus sim^{TD} unterstützen bei der Markteinführung der Car-to-X Technologie. Als erste Anwendung im Rahmen einer öffentlich-privaten Kooperation ist die Baustellenwarnung in Verbindung mit einer Verkehrslage-erfassung im Umfeld von Baustellen im Eurokorridor Rotterdam – Frankfurt am Main – Wien vorgesehen, die bereits bei geringen Ausstattungsraten einen für den Fahrer erlebbaren Nutzen und einen Sicherheitsgewinn für das Baustellenpersonal erwarten lässt.
15. sim^{TD} hat die Standardisierung der Car-to-X Nachrichtenformate und der Schnittstellen zur Lichtsignalsteuerung vorangetrieben.
16. Die für den sim^{TD}-Prüfstand entwickelten Testszenarien wurden bei der Standardisierungsbehörde ETSI als Grundlage für die Entwicklung von Konformitäts- und Interoperabilitätsprüfungen eingebracht.

Der vorliegende Teil A des TP5-Abschlussberichtes greift diese Kernaussagen auf und leitet sie aus den Ergebnissen des sim^{TD}-Feldversuches und des sim^{TD}-Simulationslabors ab. Dabei ist Teil A das Manteldokument für den TP5-Abschlussbericht. Für den interessierten Leser, der sich in die sim^{TD}-Ergebnisse weiter vertiefen möchte, enthält Teil A entsprechende Verweise auf die Teile B, welche sich wie folgt gliedern:

Teil B-1A	GIDAS Wirkfeldanalyse
Teil B-1B	Volkswirtschaftliche Bewertung
Teil B-2	Nutzerakzeptanz, IT-Sicherheit, Datenschutz und Schutz der Privatsphäre
Teil B-3	Technische Bewertung des sim ^{TD} -Feldversuches
Teil B-4	Ökonomische Analyse
Teil B-5	Rechtliche Rahmenbedingungen

1 sim^{TD}: Einzigartig und erfolgreich

In dem bislang größten Feldversuch zur Car-to-X Kommunikation wurde erstmals mit dem DRIVE Center eine kooperative Verkehrszentrale aufgebaut. Diese war mit den Verkehrszentralen des Landes Hessen und der Stadt Frankfurt am Main über eine standardisierte Schnittstelle vernetzt und kommunizierte über mehr als 100 ITS Roadside Stations (IRS) mittels Car-to-X Technologie mit 120 Fahrzeugen.



Abbildung 1: Platzierung der IRS an einer Verkehrszeichenbrücke

Die Integration von Fahrzeug-, Kommunikations- und Verkehrstechnologien in ein Gesamtsystem war eine entscheidende Forschungs- und Entwicklungsleistung von sim^{TD}. Die wesentlichen Bausteine dieses Gesamtsystems sind die ITS Central Station (sim^{TD}-Versuchszentrale), die straßenseitige ITS Roadside Station (IRS) und die fahrzeugeigene ITS Vehicle Station (IVS). Jedes sim^{TD}-Fahrzeug nutzt Sensoren, um Verkehrseignisse, wie einen sich bildenden Stau oder Glättegefahr, zu erkennen. Diese Daten werden dann bei Bedarf zusammen mit anderen relevanten Informationen, wie etwa der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit, vom eigenen Fahrzeug (IVS) an andere Fahrzeuge (IVS) und über die straßenseitige Infrastruktur (IRS) an die Verkehrszentrale (ICS) kommuniziert. Dies kann sowohl über Mobilfunk als auch ITS G5 geschehen.

1.1 ITS Roadside Station (IRS)

Die IRS ist ein intelligenter, stationärer, straßenseitiger Kommunikationsknoten, der eine Verbindung zwischen den ITS Vehicle Stations (IVS) und der ITS Central Station (ICS) ermöglicht. Die IRS beinhaltet eine Laufzeitumgebung für dezentrale ITS-Funktionen. Ein hochverfügbares Managementsystem [1], das in der ICS installiert ist, erlaubt die zentrale Administration des IRS-Netzes. Im gesamten Versuchsgebiet installierten sim^{TD}-Experten mehr als 100 IRS: 80 an Autobahnen und Bundesstraßen im Rhein-Main-Gebiet sowie 23 an Lichtsignalanlagen (LSA) im Stadtgebiet Frankfurt am Main.

Die IRS bestehen aus den Hardware-Komponenten Application Unit (AU) mit dazugehöriger Reboot-Einheit und einer Car Communication Unit (CCU) nebst zwei WLAN-Antennen und einer kombinierten WLAN-, GPS- und UMTS-Antenne. Nach Möglichkeit wurden die IRS an Autobahnen in bestehende Anlagen integriert. Ansonsten wurden neue Standorte aufgebaut.

Die AU wurde ebenerdig in Streckenstationen von Autobahnen und Bundesstraßen beziehungsweise im elektrotechnischen Teil der LSA-Steuergeräte im Stadtgebiet untergebracht. Die CCU hingegen befindet sich an höher gelegenen Signalmasten oder Verkehrszeichenbrücken, um eine bessere Funkerreichbarkeit zu ermöglichen.

Die IRS sind zu einem Drittel über eine Lichtwellenleiter (LWL)-Verbindung an die Verkehrszentrale (ICS) angebunden, die anderen zwei Drittel nutzen eine 3G-Mobilfunk-Verbindung. Zudem musste sim^{TD} weitere technische Voraussetzungen schaffen, um die hybride Car-to-X Technologie innerhalb von Frankfurt am Main testen zu können. So mussten die sim^{TD}-Techniker eine Verbindung zwischen IRS und der Steuerung der LSA schaffen, damit ein Fahrzeug beispielsweise für die sim^{TD}-Funktion *Grüne Welle* Informationen erhalten kann. Diese dienen beispielsweise dazu, dem Fahrer die Geschwindigkeit anzuzeigen, mit der er die nächste LSA bei Grün erreichen kann.



Abbildung 2: Platzierung von CCU und Antennen auf Verkehrszeichenbrücke

Diese direkte Schnittstelle stellt sicher, dass die LSA-Daten an die IRS weitergeben kann, welche schließlich alle relevanten Informationen an die IVS im Fahrzeug weiterleitet. Die Kommunikation erfolgte über eine offene, standardisierte Schnittstelle gemäß dem OTS2-Modell. Je nach Alter des Steuergerätes waren daher teilweise komplett neue Steuergeräte erforderlich. Um sämtliche LSA-abhängigen Funktionen testen zu können, rüstete sim^{TD} 14 der insgesamt 23 IRS im städtischen Versuchsgebiet im Stadtteil Frankfurt-Niederrad mit einer Schnittstelle zur entsprechenden LSA aus.

Die Kommunikation zwischen der LSA und der IRS läuft über den Verkehrsrechner in der Integrierten Gesamtverkehrsleitzentrale (IGLZ) der Stadt Frankfurt am Main. Die LSA-Daten und weitere sim^{TD}-Daten werden über die IRS an die Fahrzeuge übermittelt. Die weiteren IRS sind zwar in und an LSA installiert, dienen jedoch ausschließlich der Kommunikation mit den Fahrzeugen und sind daher nicht mit einer Schnittstelle zur LSA ausgestattet. Diese IRS stellen die Verbindung vom Autobahnnetz zum städtischen Versuchsgebiet dar, so dass auf einer durchgehenden Route die Kommunikation zwischen Fahrzeugen (IVS) und der Infrastruktur (ICS und IRS) gewährleistet ist. Auf diesem Weg können Daten für verschiedene Funktionen aus der sim^{TD}-Versuchszentrale (ICS) an die Fahrzeuge übermittelt werden.

1.2 ITS Central Station (ICS).

Hessen Mobil hat für die sim^{TD}-Versuchszentrale eine Software entwickelt, welche die Grundlage für die Verkehrszentrale der Zukunft darstellt. Die sogenannte ITS Central Station (ICS) ist der zentrale Software-Baustein für das sim^{TD}-System. Die sim^{TD}-Versuchszentrale, zuhause im von Hessen Mobil betriebenen DRIVE-Center, befindet sich auf dem Gelände der Verkehrszentrale Hessen in Frankfurt-Rödelheim und bietet verschiedenen Forschungsprojekten eine Heimat für die Erprobung des intelligenten Verkehrs von morgen.

Als Basis für die sim^{TD}-Funktionen fügt die Versuchszentrale (ICS) Daten von den beiden beteiligten Verkehrszentralen – der Verkehrszentrale Hessen (VZH) und der Integrierten Gesamtverkehrsleitzentrale (IGLZ) – zusammen. Die verkehrstechnischen Daten der VZH, wie die Verkehrslage- und Baustellendaten, werden der ICS über einen Verteilerdienst bereitgestellt. Die Daten der VZH wurden über eine Internetverbindung an die ICS übergeben. Eine direkte Verbindung der ICS zur VZH ist nicht vorhanden. Die Verbindung der IGLZ an die ICS erfolgt über eine ausreichend dimensionierte LWL-Verbindung. Diese wurde für den Feldversuch von der Stadt Frankfurt am Main aufgebaut und betrieben.

Über diesen Kommunikationsweg können so aufbereitete Daten, im konkreten Fall die städtische Verkehrslage, Baustellen sowie Daten zu den betroffenen Lichtsignalanlagen, von den innerstädtischen IRS an die ICS übermittelt werden. Im Ergebnis erzeugt die sim^{TD}-Funktion Verkehrslage in der ICS auf Grundlage fusionierter Daten aus der VZH und der IGLZ sowie den mit dem sim^{TD}-System ausgestatteten Fahrzeugen eine dynamische Darstellung der Verkehrssituation.

Mit der Ermittlung und Bereitstellung einer präzisen und aktuellen Verkehrslage schaffte sim^{TD} eine wesentliche Voraussetzung für den Feldversuch. Hessen Mobil erzeugt schon seit vielen Jahren erfolgreich eine Verkehrslage aus stationär erfassten Verkehrsdaten. Für sim^{TD} wurde diese Verkehrslage um Floating-Car-Data, also anonymisierter Daten von sich bewegendem Fahrzeugen im Netz, erweitert. Somit können drei Verkehrslagen generiert werden: eine Verkehrslage aus stationären Detektoren, eine Verkehrslage aus sich bewegendem Fahrzeugen und eine fusionierte Verkehrslage aus diesen beiden Verkehrslagen. Die fusionierte Verkehrslage wird in Form einer schematisierten Karte als Informationsservice bereitgestellt. Sie dient außerdem den verschiedenen sim^{TD}-Funktionen als Datengrundlage.

In 41.000 Stunden wurden von 500 Teilnehmern mit 120 Fahrzeugen, darunter mehrere Motorräder, 1.650.000 Kilometer gefahren - ein einzigartiger Feldversuch.

Nach mehrjähriger Forschungsarbeit organisierte sim^{TD} im Zeitraum von Juli bis Dezember 2012 den bislang größten Feldversuch zur Fahrzeug-zu-Fahrzeug und Fahrzeug-zu-Infrastruktur Kommunikation (Car-to-X Kommunikation). Dabei wurde die Zukunftstechnologie erstmalig unter realitätsnahen Bedingungen auf Akzeptanz, Alltagstauglichkeit und Wirksamkeit getestet.

Die Modellregion Frankfurt am Main bietet optimale Rahmenbedingungen für einen Feldversuch zur Car-to-X Kommunikation. Ein hohes Verkehrsaufkommen, modernste Verkehrserfassungs- und Verkehrssteuerungsanlagen sowie alle relevanten Straßenkategorien sind vorhanden. Das Verkehrsmanagement ist gut vernetzt und in der Region wurden bereits in der Vergangenheit ähnliche Forschungsprogramme durchgeführt.

Für die Zeit des Feldversuchs wurde im DRIVE-Center Hessen die sim^{TD}-Versuchszentrale zur Steuerung der Fahrversuche eingerichtet. Zur Erprobung sämtlicher sicherheitsrelevanter Fahrversuche wurde auf dem ehemaligen Kasernen-Areal der US-Streitkräfte in Friedberg das sim^{TD}-Testgelände aufgebaut. Die sim^{TD}-Versuchsflotte bestand aus 120 Fahrzeugen – von jedem der sechs beteiligten Fahrzeughersteller 20 Mittelklassefahrzeuge eines jeweils

einheitlichen Typs – sowie drei Motorrädern. Im Vorfeld des Feldversuchs hatten sim^{TD}-Experten alle Fahrzeuge mit der gleichen Technik ausgestattet, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Die Fahrversuche, welche die Car-to-X Technologie auf die Probe stellten, wurden von sim^{TD}-Spezialisten für Verkehrspsychologie und -technik konzipiert. Sie ermittelten, welche Szenarien es zu untersuchen galt, und definierten anschließend in Drehbüchern, wie diese Szenarien exakt aussehen sollten. So erstellten die Experten vor dem Feldversuch insgesamt 85 Drehbücher, von denen ein jedes auf die Untersuchung einzelner sim^{TD}-Anwendungsfälle abzielte.

Die anwendungsbezogene Überprüfung der Car-to-X Technologie auf der Straße erfolgte durch kontrollierte Fahrversuche. Die Organisation zur Durchführung und Betreuung der Versuche ist vom Personaleinsatz her vergleichbar mit einem kleinen mittelständischen Unternehmen.

Während des Feldversuchs wurden die Drehbücher, welche die exakten Versuchsanweisungen dokumentieren, unter verschiedenen Bedingungen mehrfach wiederholt, zum Beispiel in stockendem und in frei fließendem Verkehr. Während der Versuchslaufzeit konnten somit insgesamt 993 Szenarien absolviert werden. Zusätzlich zu den kontrollierten Fahrten, die auf Drehbüchern basierten, untersuchten die sim^{TD}-Experten auch das Gesamtsystem mit allen sim^{TD}-Funktionen.

Den Feldversuch teilten die Projektbeteiligten in drei Versuchsblöcke à acht Wochen. Die Planung der Versuchsdurchführung erfolgte in mehreren Schritten: Eine Grobplanung für den jeweiligen achtwöchigen Versuchsblock, eine Detailplanung für einzelne Versuchswochen, um beispielsweise Baustellen und Veranstaltungen zu berücksichtigen, und eine Tagesplanung, die auf aktuelle Ereignisse reagierte.

Zehn gesondert ausgewählte Fahrer erhielten vor Beginn des Feldversuchs eine besonders intensive Einführung in die sim^{TD}-Technik und wurden kontinuierlich über die drei Versuchsblöcke hinweg als so genannte Expertenfahrer eingesetzt. Für die restlichen Fahrzeuge wurden die Versuchsfahrer in jedem der drei Versuchsblöcke ausgewechselt. Insgesamt kamen so mehr als 500 Versuchsfahrer im Alter zwischen 23 und 65 Jahren zum Einsatz. Der Feldversuch wurde permanent durch ein Team von 17 Experten betreut.

Der Versuchsflottenstützpunkt war der zentrale Anlaufpunkt für die Versuchsfahrer. Hier erhielten sie täglich ihre Fahrzeuge zugeteilt und wurden über den Tagesablauf und die Verteilung der Flottenfahrzeuge unterrichtet. Der Versuchsflottenstützpunkt war zudem der Ort für die Nutzerbefragungen, welche im Anschluss an die Fahrversuche stattfanden. Die Koordination der Versuchsfahrer erfolgte aus der Versuchszentrale heraus, in welcher bis zu fünf Operatoren gleichzeitig arbeiteten.

Während des Feldversuchs wurden in mehr als 41.000 Versuchsstunden insgesamt über 1.650.000 Fahrkilometer absolviert. Insbesondere, wenn Autobahnszenarien getestet wurden, stieg die wöchentliche Kilometerleistung auf bis zu 120.000 Kilometer.

In Ergänzung zum Feldversuch wurde eine eigenständige Simulationsumgebung, bestehend aus Fahrsimulation und Verkehrssimulation, aufgebaut. Die Erkenntnisse aus den Simulationen wurden mit den Ergebnissen des Feldversuchs zu einer Gesamtbewertung der Zukunftstechnologie Car-to-X zusammengeführt.

Extreme Wetterbedingungen und riskante Fahrmanöver, die in einen Unfall münden können: All das bürdet das sim^{TD}-Simulationslabor den Versuchsfahrern auf – virtuell, versteht sich. Mit den Fahr- und Verkehrssimulationen wird die Wirksamkeit von sim^{TD}-Funktionen im Fahrsimulator evaluiert, ohne Gefahr.

Ein Auto rast über die Autobahn. Auf der nassen Fahrbahn kommt es ins Schlingern und kracht in die Leitplanke. Schreckensszenarien wie diese, will sim^{TD} verhindern und das Fahren sicherer, effizienter und komfortabler machen. Getestet werden müssen solche Szenarien dennoch. Dafür gibt es das sim^{TD}-Simulationslabor. Alle Simulationen fanden in der Versuchsumgebung unter realistischen Bedingungen statt. Das Versuchsgelände sowie sämtliche Verkehrs- und Verhaltenszustände wurden realistisch inszeniert, Stadt-, Land-, Bundesstraßen und Autobahnszenarien entsprechend abgebildet. Damit das Verhalten der Versuchsfahrer im Labor dem der Versuchsfahrer auf der Straße möglichst nahe kommt und die Realität abbildet, schulte sim^{TD} die Probanden mit Fahrertrainings, um die Fahrer an das Simulatorfahrzeug zu gewöhnen und so Simulatorübelkeit zu vermeiden.

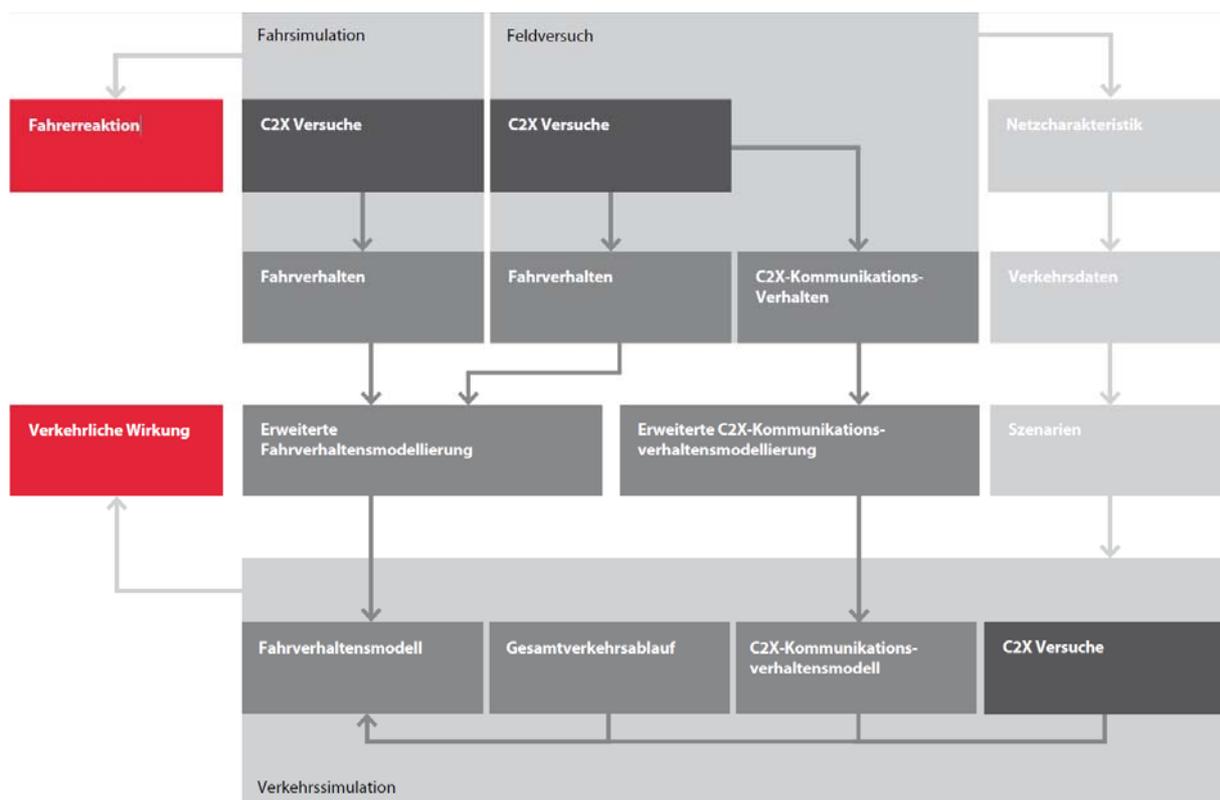


Abbildung 3: Zusammenspiel der Versuche in sim^{TD}

Das Simulationslabor widmete sich zwei unterschiedlichen Simulationen: der Fahrersimulation und der Verkehrssimulation. Dies war notwendig, weil realen Feldversuchen, methodisch gesehen, Grenzen gesetzt sind. Besonders kritische oder eher seltene Fahrsituationen können so mit zahlreichen Versuchsfahrern ausführlich getestet werden, ohne dass den Fahrern körperlicher Schaden droht. Zudem können äußere Einflüsse und seltene Verkehrszustände nur bedingt wiederholt und daher im Zweifel nicht genügend oft getestet werden. Deshalb muss die Simulation hier unterstützen. Getestet haben die Wissenschaftler, ob und wie sich sicherheitskritische Situationen mit sim^{TD}-Funktionen besser bewältigen lassen.

Zusätzlich betrachteten die sim^{TD}-Experten dazu zahlreiche Fahrer-Fahrzeug-Einheiten in Verkehrsflusssimulationen. So konnten die Wissenschaftler Rückschlüsse ziehen und Vergleiche anstellen, welche Auswirkung sim^{TD} auf den Verkehr hat. Es handelt sich um ein perfektes System – Störfaktoren und Fehlerquellen wie im realen Verkehr, zum Beispiel leere Tanks oder liegengebliebene Autos, stellen kein Problem dar – sie werden höchstens absichtlich simuliert. So können die Experten im Labor anhand der Messdaten überprüfen, inwieweit sim^{TD} die erhoffte Wirkung erzielt, das Fahren sicherer, effizienter und bequemer zu gestalten.

In der Fahrsimulation konnte gezeigt werden, dass durch die sim^{TD}-Funktionen das Geschwindigkeits- und Abstandsverhalten der Fahrer positiv beeinflusst wird, so dass Fahrsicherheit und Fahreffizienz erhöht werden.

Macht sim^{TD} das Fahren sicherer und effizienter? In der Fahrsimulation des sim^{TD}-Simulationslabors haben Experten nachweisen können, dass die sim^{TD}-Funktionen den Fahrer positiv beeinflussen. Geschwindigkeit und Abstandsverhalten werden mit sim^{TD} dem Verkehr angepasst. So werden Fahrsicherheit und -effizienz erhöht.

Methodisch gesehen sind realen Feldversuchen Grenzen gesetzt: Äußere Einflüsse und seltene Verkehrszustände beispielsweise können nur bedingt wiederholt und daher im Zweifel nicht hinreichend oft geprüft werden. Deshalb haben sim^{TD}-Experten ergänzend zum Feldversuch die Fahrsimulation eingeführt. Im virtuellen Abbild der Versuchsstrecke konnte so überprüft werden, ob und wie sich sicherheitskritische Situationen mit sim^{TD}-Funktionen besser bewältigen lassen, so zum Beispiel, wie Fahrer auf Geschwindigkeitsempfehlungen in Kreuzungsbereichen reagieren. Die Simulationen ermöglichen es, die Auswirkung von Stau oder freiem Verkehr unter exakt gleichen Rahmenbedingungen – mit und ohne sim^{TD}-Warnung – zu vergleichen.

Um die sim^{TD}-Funktionen sinnvoll zu testen, benötigten die Experten qualitativ unterschiedliche Situationen. Die Simulationen erlaubten sowohl Tests im virtuellen Abbild der Landstraßen Hessens als auch im innerstädtischen Verkehr Frankfurt am Mains. So sind die Ergebnisse der Fahrsimulation nicht unmittelbar miteinander vergleichbar, erlauben aber alle Rückschlüsse auf den Nutzen der sim^{TD}-Funktionen. Dabei lag der Schwerpunkt der Analysen auf der Beschreibung des Fahrerverhaltens und der Nutzerakzeptanz im jeweiligen Anwendungsfall.

Das Fazit der sim^{TD}-Wissenschaftler: Die in der Fahrsimulation geprüften sim^{TD}-Funktionen erhöhten systematisch die Sicherheit während der Fahrt. Im direkten Vergleich einer Fahrt mit sim^{TD}-Warnungen und einer Fahrt ohne sim^{TD}-Warnungen hat sich gezeigt, dass Fahrer ihre Geschwindigkeit beim Durchfahren des Simulatorparcours systematisch reduzierten, wenn sim^{TD} sie vor einer Gefahr warnte. Insgesamt wurden Abstandsverhalten und Geschwindigkeit bei Annäherung, Durchfahrung und Vorbeifahrt an einem Ereignis positiv beeinflusst. Die Fahrfehlerquote in der Simulation wurde durchweg reduziert und die Gesamtleistung verbessert.

1.3 Beispiel Hinderniswarnung

Der sim^{TD}-Anwendungsfall *Warnung vor Hindernissen auf der Fahrbahn* bewirkte, dass Fahrer ihre Geschwindigkeit rechtzeitig reduzieren und das angekündigte Hindernis somit langsamer passierten. Dabei war es unerheblich, ob sim^{TD} vor einem spezifischen oder unspezifischem Hindernis warnte. In beiden Fällen passten die Fahrer ihr Fahrverhalten in vergleichbarer Weise an, so dass sich die Fahrsicherheit erhöhte. und insgesamt eine positive Wirkungen auf die Fahrsicherheit erzielt wurde. Der Versuch wurde von 20 Fahrern im Alter von 20 bis 58 Jahren durchlaufen. Das mittlere Alter lag bei 29 Jahren. Es nahmen acht Männer und zwölf Frauen an den Versuchen teil. Die Fahrer durchfuhren Landstraßen und Autobahnabschnitte sowohl unter freien als auch unter dichten Verkehrsbedingungen.

1.4 Beispiel Elektronisches Bremslicht

Die sim^{TD}-Funktion *Elektronisches Bremslicht* erweitert die Sicht des Fahrers, so dass dieser Kenntnis vom Verkehrsgeschehen hat, welches er nicht sehen kann. Ein Fahrer profitiert von der sim^{TD}-Warnung insbesondere dann, wenn sich das bremsende Fahrzeug nicht unmittelbar in Sichtweite befindet, sondern verdeckt ist, beispielsweise durch mehrere

vorausfahrende Fahrzeuge. In diesem Fall wird die Time-to-Collision beim Fahren mit sim^{TD} größer als beim Fahren ohne sim^{TD}. Wenn sich das bremsende Fahrzeug jedoch unmittelbar vor dem sim^{TD}-Fahrzeug befindet, wird dieser Effekt negiert, die Time-to-Collision ist in dieser Konstellation geringer. Die Versuchsfahrer berichten, dass sie in dieser Stresssituation durch die zusätzliche Warnung eher abgelenkt wären, da die Warnung parallel zur eigenen Wahrnehmung stattfand. Daher empfiehlt sim^{TD}, dass die Funktion *Elektronisches Bremslicht* nur dann vor starken Bremsungen vorausfahrender Fahrzeuge warnen sollte, wenn diese nicht unmittelbar vor dem eigenen Fahrzeug stattfinden. In einem solchen Fall sollten eher aktive Assistenzsysteme wie Abstandshalte- und Bremsassistenten zum Einsatz kommen.

Der Versuch wurde von 20 Fahrern im Alter von 20 bis 58 Jahren durchlaufen. Das mittlere Alter lag bei 29 Jahren. Es nahmen acht Männer und zwölf Frauen an den Versuchen teil. Die untersuchten Parcours umfassten Landstraßen und Autobahnabschnitte.

1.5 Beispiel Ampelphasenassistent

Bei den Tests zur sim^{TD}-Funktion *Ampelphasenassistent* konzentrierten sich die Experten insbesondere auf die Interaktion mehrerer Fahrer miteinander. In diesem Anwendungsfall erhalten Fahrer Geschwindigkeitsempfehlungen, während sie sich einer Kreuzung nähern oder eine Kreuzung durchfahren. Diese Empfehlungen sollen helfen, durch eine Grüne Welle zu fahren. Müssen die Fahrer an einer roten Ampel halten, so informiert sie die sogenannte Restrotanzeige, wie lange es noch bis zum Umschalten auf Grün dauert.

Um dieses Szenario zu testen, durchfuhren vier Fahrer gemeinsam eine Simulatorstrecke, während der Ampelphasenassistent ihnen Geschwindigkeitsempfehlungen gab. Diese Funktion erzielte in der Simulation gleich zwei Erfolge: sowohl die Anhaltewahrscheinlichkeit an Kreuzungen als auch die Anzahl der Geschwindigkeitsüberschreitungen in der Kreuzungsanfahrt sanken. Diese Befunde gelten besonders für das jeweils erste Fahrzeug einer Kolonne, da es nicht von vorausfahrenden Fahrzeugen beeinflusst wurde. Ergebnis: Der Ampelphasenassistent erhöht Fahreffizienz und Fahrsicherheit im städtischen Bereich.

Am Versuch nahmen 60 Fahrer im Alter von 21 bis 65 Jahren teil. Das mittlere Alter lag bei 37 Jahren. Von den Versuchsfahrern waren 30 männlich und 30 weiblich. Jeweils vier Fahrer durchfuhren gemeinsam sowohl Landstraßen- als auch Innenstadtabschnitte.

1.6 Verkehrssimulation

In den Verkehrssimulationen konnte das Potential von sim^{TD}-Funktionen bei verschiedenen Ausstattungsdaten in einem virtuellen Abbild des Versuchsgebietes nachgewiesen werden.

Die sim^{TD}-Experten für Verkehrstechnik haben die Wirkung der sim^{TD}-Funktionen ergänzend zum Feldversuch mit Hilfe von Verkehrssimulationsmodellen ermittelt. Dabei verglichen die Wissenschaftler unter kontrollierten Randbedingungen unterschiedliche Ausstattungsdaten aller Fahrzeuge im Versuchsgebiet in sonst identischen Situationen.

Im virtuellen Abbild des Versuchsgebietes in und um Frankfurt am Main simulierten die Wissenschaftler insgesamt 13 sim^{TD}-Funktionen. Aus 102 untersuchten Szenarien ergaben sich mehr als 1.000 GB Rohdaten und zirka 2.000 Auswertungsprotokolle. So konnten die Verkehrstechniker die Auswirkungen der sim^{TD}-Funktionen auf die Fahr- und Verkehrseffizienz sowie auf die Verkehrssicherheit mit unterschiedlichen Ausstattungsdaten mehrerer tausend Fahrzeuge in einem großen Gebiet ermitteln und vergleichen.

Simulationsmodell. Mit Hilfe der sim^{TD}-Verkehrssimulation bildeten die Verkehrstechniker das gesamte Streckennetz des sim^{TD}-Versuchsgebiets inklusive der relevanten Verkehrsinfrastruktur und aller Verkehrssituationen detailliert nach. Die Wissenschaftler modellierten dafür mehr als 190 Straßenkilometer aus dem sim^{TD}-Versuchsgebiet – rund 100 Kilometer Autobahn, 65 Kilometer Bundesstraße und 25 Kilometer Stadtstraße.

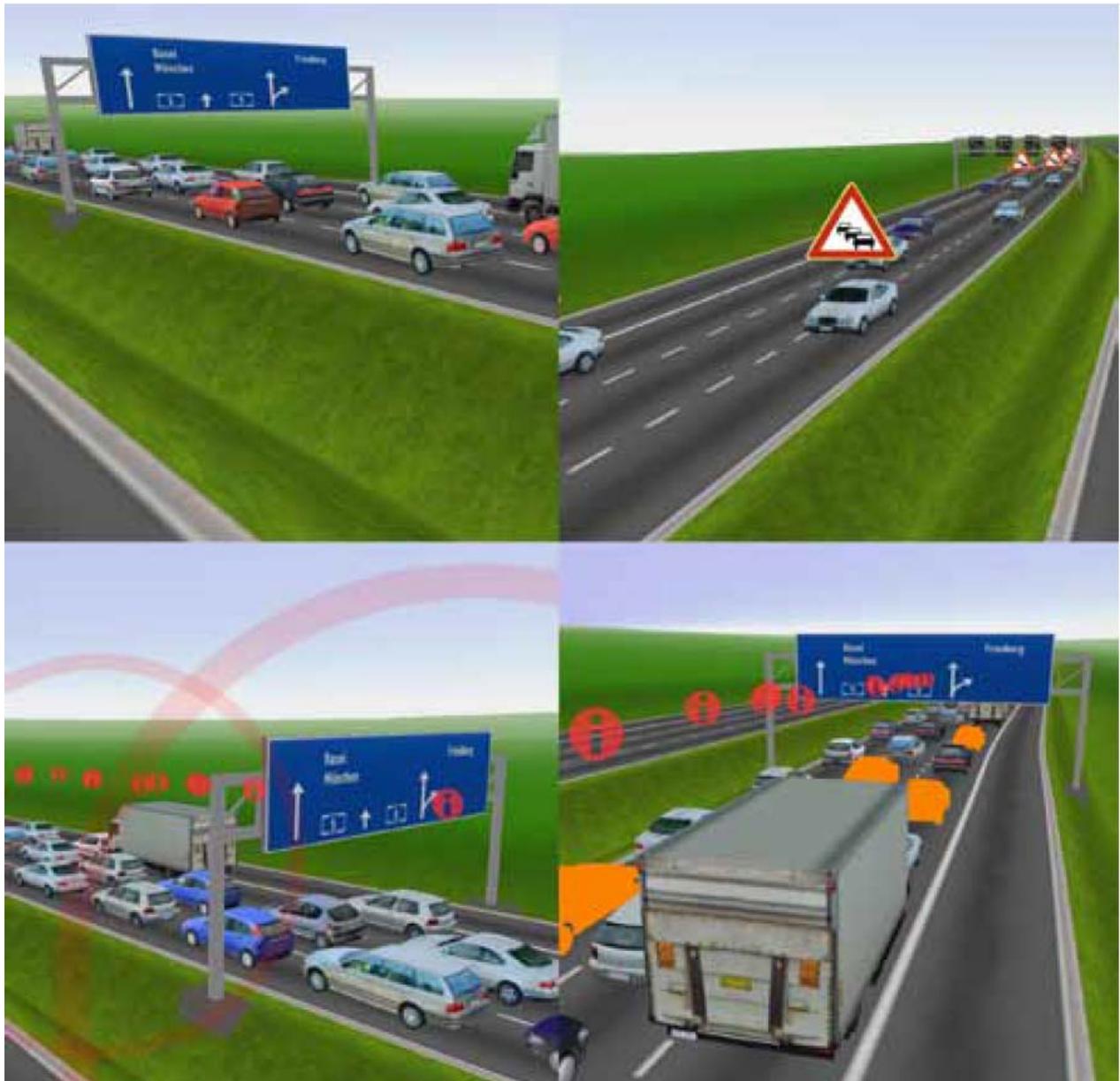


Abbildung 4: Darstellung der Informationsausbreitung der Stauendwarnung auf der Autobahn A5 im sim^{TD}-Versuchsgebiet in der sim^{TD}-Verkehrssimulation.

Je nach simulierter sim^{TD}-Anwendung wählten die Forscher einen geeigneten Ausschnitt aus dem Netzmodell aus: Autobahnstrecken für Warnungen auf der Autobahn, ein großräumiges Netz aus Autobahnen und Bundesstraßen für Routing-Anwendungen und einen innerstädtischen Bereich für Szenarien mit Lichtsignalanlagen. So konnten 13 sim^{TD}-Anwendungen nachgebildet und in die Verkehrssimulationssoftware implementiert werden. Die modellierten Szenarien – jeweils variierend in Verkehrszustand, Ausstattungsrate und Parametern wie zum Beispiel Baustellenpositionen – wurden entsprechend ihrer spezifischen Anforderungen in der Simulation aufgebaut und konfiguriert.

Die Netzmodelle der Verkehrssimulation wurden auf Basis von realen Verkehrsmessungen kalibriert und der Verkehrsfluss entsprechend validiert. Zur Abbildung der Car-to-X Kommunikation wurde ein etabliertes Modell für die Übertragung von Car-to-X Nachrichten erweitert und validiert. So erzielten die Wissenschaftler eine sehr realistische Modellumgebung.

Die Steuerungsmodule, wie zum Beispiel zur Ampelsteuerung, wurden dem realen Einsatz entsprechend in die Simulation übernommen. Das Fahrverhalten der virtuellen Fahrzeuge wurde gemäß realer Fahrerreaktionen aus der Fahrsimulation modelliert. Insgesamt fuhren so mehr als zwei Millionen virtuelle Fahrzeuge durch die sim^{TD}-Verkehrssimulationen. Die verwendeten Simulationsrechner waren für diese Leistung mehr als 66 Tage durchgehend im Einsatz.

Auswertung. Im Ergebnis produzierten die Verkehrssimulationen mehr als 1.000 GB Rohdaten. Diese Datenmenge machten die Verkehrstechniker mit Hilfe speziell konzipierter Modelle in Datenbanken handhabbar und stellten diese für weitere Analysen zur Verfügung. Für die definierten Validierungsziele zur Verkehrs- und Fahreffizienz sowie Verkehrssicherheit berechneten die Experten je nach Anwendungsfall bis zu zehn Kenngrößen. Für die simulierten Szenarien ergaben sich so knapp 2.000 verschiedene Auswertungsergebnisse. Die Unterschiede in den Kenngrößen zwischen einzelnen Szenarien wurden mit Hilfe von statistischen Tests auf ihre Signifikanz hin untersucht. Damit konnten die Forscher die Wirkung der simulierten sim^{TD}-Funktionen unter verschiedenen Bedingungen ermitteln.

Auf Car-to-X Kommunikation basierende Warnungen zeigen Wirkung. In den untersuchten Anwendungsfällen zeigten sich signifikante Unterschiede für die mittleren und minimalen Längsbeschleunigungen oder die mittleren Geschwindigkeiten der virtuellen Fahrzeuge. Bei höheren Ausstattungsraten bremsen die simulierten Fahrzeuge auch meist weniger stark. Im freien Verkehr zeigten sich Effekte der Fahrerreaktionen auf den Verkehr deutlicher als im dichten Verkehr, da der Einfluss vorausfahrender Fahrzeuge geringer war.

Die ausgestatteten Fahrzeuge beeinflussten die nicht ausgestatteten Fahrzeuge häufig positiv – der Mitzieheffekt. Nur in Einzelfällen konnten die Wissenschaftler einen signifikanten Unterschied zwischen den Ausstattungsraten mit ITS Roadside Stations (IRS), den Übertragungsmedien (ITS G5 versus UMTS) und der Nutzung von Multi-Hop-Verfahren erkennen.

Dynamische Umfahrungshinweise verkürzen die Reisezeit. Der sim^{TD}-Anwendungsfall Umleitungsempfehlung ermöglichte vor allem bei mittleren Reisezeiten einen signifikant positiven Effekt auf die Verkürzung der Reisezeiten für alle Fahrzeuge. Es profitieren sowohl mit Car-to-X Technologie ausgestattete Fahrzeuge als auch Fahrzeuge, die nicht mit Car-to-X Technologie ausgestattet sind. sim^{TD}-Fahrzeuge hatten keinen signifikanten Vorteil gegenüber nicht ausgestatteten Fahrzeugen. Es ist damit die Tendenz zum Systemoptimum zu beobachten.

Für die Dynamische Routenplanung sind die Ergebnisse stark szenarienabhängig. Im freien und leicht stockenden Verkehr verringern sich die mittleren Reisezeiten deutlich – auch für sim^{TD}-Fahrzeuge im Vergleich zu nicht sim^{TD}-Fahrzeugen.

Fahrzeug-zu-Infrastruktur Kommunikation an Lichtsignalanlagen bringt Effizienzgewinn. Hinsichtlich der untersuchten Kenngrößen zeigt sich durch die Erhöhung der Ausstattungsraten für die Funktionen mit Lichtsignalanlagenkommunikation ein deutliches Potenzial zur Verbesserung der Verkehrseffizienz, sowohl für ausgestattete als auch für nicht ausgestattete Fahrzeuge. sim^{TD}-Fahrzeuge selbst haben in vielen Fällen einen signifikanten Vorteil gegenüber nicht ausgestatteten Fahrzeugen. Die Ergebnisse beim Vergleich verschiedener Ausstattungsraten hängen stark von den vorherrschenden Randbedingungen ab. An einer Kreuzung zeigt sich eine deutliche Verbesserung, an einem

T-Knotenpunkt mit verschiedenen zulässigen Höchstgeschwindigkeiten in den Zufahrten zeigen sich indifferente Ergebnisse. Insofern sind die Ergebnisse umgebungsabhängig.

Das Potenzial einer Verbesserung der Verkehrseffizienz hinsichtlich der betrachteten Kenngrößen kann für alle Funktionen zur Lichtsignalanlagensteuerung und Ampelphasenassistenz hervorgehoben werden.

2 Car-to-X bereit für den Markt

2.1 Technologie besteht Reifeprüfung

Die Car-to-X Technologie konnte unter Alltagsbedingungen ihre Tauglichkeit zeigen, die zugrundeliegenden Konzepte wurden bestätigt.

Unter realitätsnahen Bedingungen haben die Car-to-X Technologie und die sim^{TD}-Funktionen ihre Praxistauglichkeit auf den Straßen in und um Frankfurt am Main gezeigt. Die Eignung von Mobilfunk und ITS G5 als Grundlage für den Einsatz als Car-to-X Kommunikationstechnologie ist nun bestätigt.

Der Nachweis der Praxistauglichkeit war die zentrale Aufgabe des sim^{TD}-Feldversuches. Die Wissenschaftler konnten zeigen, dass die Car-to-X Kommunikation unter realitätsnahen Bedingungen zwischen Fahrzeugen, den straßenseitigen ITS Roadside Stations (IRS) und der ITS Central Station (ICS) zuverlässig funktioniert [2].

Damit das Fahrzeug (ITS Vehicle Station, IVS) mit seiner Umgebung kommunizieren kann, ist es mit einer Kommunikationseinheit (Car Communication Unit, CCU) ausgestattet, welche die Kommunikation über ITS G5 und Mobilfunk ermöglicht. Die CCU greift zudem lesend auf den Fahrzeugdatenbus (Controller Area Network, CAN) zu, um beispielsweise den Zustand der Blinker, des Regensensors oder der Nebelscheinwerfer zu erhalten [3]. Diese Information dient den Car-to-X Funktionen z. B. dazu, Wetterwarnungen zu generieren oder die von der Ampel empfangene Restrotzeit der eigenen Fahrtrichtung zuzuordnen. Die fahrzeugbezogenen Teile der Car-to-X Funktionen laufen bei sim^{TD} als Bundles in einem OSGi-Framework auf einer eigenen Rechneinheit (Application Unit, AU) [4]. Beide Einheiten, die AU als kommerzieller Fahrzeugrechner und die CCU als eigens für das Projekt entwickelte Komponente, kommunizieren miteinander über Ethernet. Die von der AU generierten Nachrichten werden von der CCU über die dort angeschlossenen Antennen verbreitet. Der Empfang einer Nachricht läuft entsprechend. Nach der Zwischenspeicherung in der so genannten Umfeldtabelle findet im empfangenden Fahrzeug eine zeitliche, örtliche und fahrtrichtungsbezogene Relevanzfilterung statt [5]. Erst dann wird die eingegangene Nachricht von den Car-to-X Funktionen verwertet.

Die für die Funktion essenzielle Positionierung basiert auf der Verknüpfung von Fahrdynamikdaten aus dem Fahrzeug mit GPS. In Versuchen konnte gezeigt werden, dass dieser Ansatz funktioniert und für die Funktionen ausreichende Genauigkeiten liefern kann. Ebenso wurde die zeitliche Synchronisierung der Kommunikationseinheiten untereinander auf GPS abgestützt [6]. So konnte durch die Kombination von lokaler, auf einem Quarz abgestützten Systemuhr und der global eindeutigen GPS-Uhr durch eine aktive Uhrenregelung erreicht werden, dass 97 Prozent aller synchronen Zeitstempel weniger als 10 Millisekunden voneinander abwichen. Dies ist eine entscheidende technische Grundlage für die folgenden Ergebnisse.

Neben der im Fahrzeug verbauten Technik wurden entsprechend aufgebaute Stationen an den Straßen installiert. Diese waren jeweils an die Verkehrszentralen der Stadt Frankfurt a. M. und des Landes Hessen angeschlossen. Um die 103 IRS Stationen, die teilweise an unzugänglichen Standorten montiert waren, kontrollieren und warten zu können, wurde ein eigenes IRS-Management-Center aufgebaut. Alle diese Komponenten und Verbindungen liefen den gesamten Feldtest hindurch reibungslos und zeigten so, dass die verwendete Technologien einen stabilen Betrieb ermöglichen. Besonders die Kopplung von LSA-Steuergeräten und IRS stellte eine besondere Herausforderung dar, die durch die erste Implementierung des OTS2-Standards gelöst wurde. Der monatelange, erfolgreiche Betrieb

dieser Verbindungen an 14 LSA demonstrierte auch hier die Tauglichkeit der entwickelten Technologie. Für die zentrale Datenaggregation der Daten aus den verschiedenen Zentralen, den IRS und den Fahrzeugen wurde eine ICS aufgebaut. In ihr wurden alle zentralenseitigen Funktionen gebündelt. Auch hier zeigt der Erfolg des Feldversuches, dass das zugrundeliegende Konzept die erprobten Funktionen ermöglicht [1].

Ein wesentlicher Vorteil der Car-to-X Technologie, die Kommunikation bei verdeckten Szenarien, z. B. der Blick um die Ecke einer Kreuzung oder durch ein Lastfahrzeug hindurch, hat sich im Feldversuch bestätigt.

Die Basis aller sim^{TD}-Funktionen ist die korrekte Übermittlung von Informationen. Damit die sim^{TD}-Funktionen fehlerfrei arbeiten können, muss gewährleistet sein, dass die Nachricht des sendenden Fahrzeugs rechtzeitig beim empfangenden Fahrzeug ankommt. Die Nachricht ist dann als rechtzeitig eingestuft, wenn die Funktion nach dem Empfang der Nachricht noch ausreichend Zeit für ihre Ausführung hat. Dies bedeutet im Falle einer Warnung vor einer Kollision (z. B. Hinderniswarnung), dass der Fahrer des empfangenden Fahrzeugs noch adäquat auf die Warnung reagieren kann und so eine Kollision verhindert wird. Das Fahrzeug muss dazu einen bestimmten Mindestabstand zum möglichen Kollisionsort haben. Der Mindestabstand hängt von der Relativgeschwindigkeit zwischen Sender und Empfänger ab und ist für jede Funktion zu definieren. Hier muss mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 99 Prozent eine für jede Funktion festzulegende Anzahl von fehlerfreien Nachrichten vom Sender empfangen worden sein. Der Abstand zwischen Sender und Empfänger, bei dem eine korrekte Nachricht mit einer Wahrscheinlichkeit von 99 Prozent erhalten wurde, wird als Reichweite definiert.

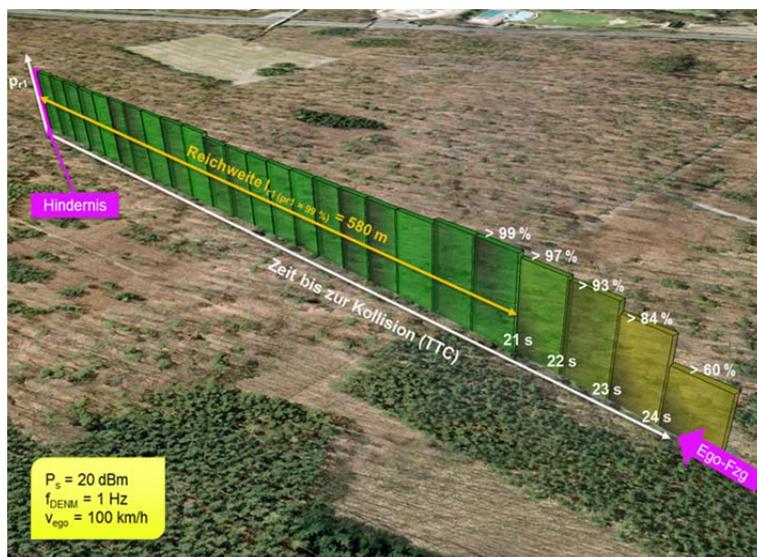


Abbildung 5: Gemessene Reichweite auf einer geraden Landstraße im Wald und ihr Einfluss auf die sim^{TD}-Funktion „Hinderniswarnung“

Der Erfolg der Übertragung hängt maßgeblich von der Sendeleistung, der Sendehäufigkeit, den Störungen des Funkkanals und dem Abstand zwischen Sender und Empfänger ab. Um die oben genannte Bedingung zu einem bestimmten Zeitpunkt zu erfüllen, werden die Nachrichten in sim^{TD} zyklisch versendet. Dabei erhöht sich die kumulative Empfangswahrscheinlichkeit mit der Anzahl pro Sekunde versendeter Nachrichten.

Im sim^{TD}-Feldversuch wurden die genannten Kommunikationsparameter untersucht und ihr Einfluss auf die Realisierbarkeit der sim^{TD}-Funktionen analysiert [7]. Die nachfolgend aufgeführten Beispiele – gerade Straße in der Stadt, gerade Landstraße im Wald, Kreuzung

in der Stadt und Kurve auf Landstraße im Wald – belegen deutlich die Praxistauglichkeit von ITS G5.

Die Abbildung 5 zeigt als Beispiel ein Szenario auf einer geraden Landstraße im Wald. Das sendende Fahrzeug stellt ein Hindernis dar und verschickt einmal pro Sekunde eine Nachricht bei einer Sendeleistung von 20 dBm. Bereits ohne Multi-Hop wurde hier eine Reichweite vom 580 Metern ($P_{r1} = 99$ Prozent) erzielt. Bei einer Geschwindigkeit des empfangenden Fahrzeugs von 100 Kilometer pro Stunde erhält das empfangende Fahrzeug 21 Sekunden vor der möglichen Kollision mit mehr als 99-prozentiger Wahrscheinlichkeit eine Nachricht vom sendenden Fahrzeug. Da der Anhalteweg bei dieser Geschwindigkeit 92 Meter beträgt, ist die Funktion *Hinderniswarnung* in diesem Szenario zuverlässig realisierbar [8].

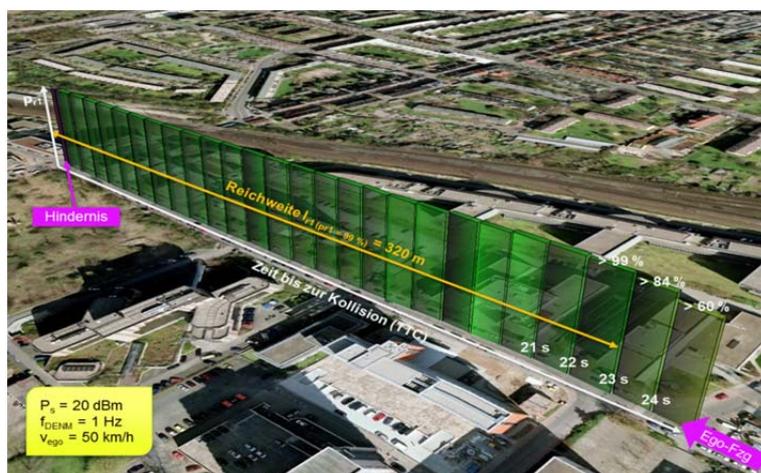


Abbildung 6: Gemessene Reichweite auf einer geraden Straße in der Stadt und ihr Einfluss auf die sim^{TD}-Funktion „Hinderniswarnung“

Bei einem vergleichbaren Szenario auf einer geraden Straße im Stadtgebiet wurde ohne Multi-Hop bereits 320 Meter vor einer möglichen Kollision mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 99 Prozent eine Nachricht vom sendenden Fahrzeug empfangen (Abbildung 6). Bei einer Geschwindigkeit von 50 Kilometer pro Stunde des empfangenden Fahrzeugs trifft die Nachricht entsprechend 23 Sekunden vor Erreichen des Kollisionsortes beim Empfänger ein. Da der Anhalteweg hier 30 Meter beträgt, ist die Funktion *Hinderniswarnung* in diesem Szenario zuverlässig realisierbar [9].



Abbildung 7: Gemessene Reichweite in einer Kurve auf einer Landstraße im Wald und ihr Einfluss auf die sim^{TD} -Funktion „Hinderniswarnung“

Das größte Potenzial an Sicherheitsgewinn erzielt die Car-to-Car Kommunikation bei der Warnung vor verdeckten, also nicht sichtbaren Gefahren, beispielsweise hinter einer Bergkuppe, einem LKW oder einer nicht einsehbaren Kurve. In Abbildung 7 befindet sich das Hindernis hinter einer Kurve und ist wegen der Bewaldung nicht sichtbar. Es sendet im Abstand von einer Sekunde Nachrichten, welche vom sich nähernden Fahrzeug auch ohne Multi-Hop bereits 6 Sekunden vor der möglichen Kollision mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 99 Prozent empfangen werden. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich das Fahrzeug in Luftlinie 83 Meter vom sendenden Hindernis entfernt. Dies entspricht der in diesem Szenario erzielbaren Reichweite. Da sich das Empfängerfahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 50 Kilometer pro Stunde bewegt, beträgt sein Anhalteweg 30 Meter. Die sim^{TD} -Funktion *Hinderniswarnung* ist also in diesem Szenario zuverlässig realisierbar. Durch eine Nachrichtenübertragung mithilfe von Multi-Hop würde die Reichweite erhöht und es könnten noch bessere Ergebnisse erzielt werden [10].



Abbildung 8: Gemessene Reichweite auf einer Kreuzung in der Stadt und ihr Einfluss auf die sim^{TD} -Funktion „Querverkehrsassistent“.

Die höchsten Anforderungen an die Kommunikation stellen Funktionen wie der *Kreuzungs- und Querverkehrsassistent*, weil die Störung durch dämpfende Hindernisse wie Gebäude typischerweise hoch ist (siehe Abbildung 8). Die Fahrzeuge bewegen sich in diesem

Szenario mit einer Geschwindigkeit von jeweils 50 Kilometer pro Stunde und senden ihre Fahrzeugdaten als Cooperative Awareness Message (CAM) mit einer Frequenz von jeweils 5 Hz. Die CAM-Sendefrequenz ist im Wesentlichen von der Fahrdynamik abhängig. Die Sendeleistung beträgt in diesem Beispiel 20 dBm. Bereits 97 Meter vor der Kreuzung als Kollisionsort wird eine Nachricht des sendenden Fahrzeugs mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 99 Prozent empfangen. Sowohl das sendende als auch das empfangende Fahrzeug sind zu dem Zeitpunkt, an welchem der Empfänger die Nachricht mit einer Wahrscheinlichkeit von 99 Prozent erhalten hat, jeweils noch 7 Sekunden von der Kreuzung entfernt. Die Luftlinie zwischen beiden Fahrzeugen beträgt dann 137 Meter. Der aus der Fahrzeuggeschwindigkeit resultierende Anhalteweg von 30 Meter ermöglicht daher die zuverlässige Realisierbarkeit der sim^{TD}-Funktion *Kreuzungs- und Querverkehrsassistent* [11].

Im Rahmen des sim^{TD}-Feldversuches wurde auch der Einfluss einer hohen Auslastung des ITS G5 Funkkanals untersucht, welche beispielsweise auftritt, wenn sich sehr viele sendende Fahrzeuge in der Nähe befinden, wie es z. B. in Stauszenarien der Fall sein kann. Dabei wurde erwartungsgemäß bestätigt, dass eine Decentralized Congestion Control (DCC) erforderlich ist, die situationsabhängig, adaptiv und dezentral die Nachrichtensenderate dynamisch einstellt [12].

Der hybride Systemansatz hat sich bestätigt, WLAN-basierte Kommunikation und Kommunikation über Mobilfunk wurden erfolgreich im Feld getestet.

Ergänzend zu ITS G5 wurde Mobilfunk hinsichtlich seiner Eignung für Car-to-X überprüft. Dazu untersuchten die sim^{TD}-Experten die jeweils zur Verfügung stehende Datenübertragungsrate und die Datenübertragungszeit von Fahrzeug zu Fahrzeug (Round Trip Time, RTT). Im Rahmen des sim^{TD}-Feldversuches wurden hierfür Test- und Messfahrten im Versuchsgebiet durchgeführt, bei denen Daten zur Mobilfunkkommunikation von Funktionen gesammelt wurden. Dies geschah begleitend zu den laufenden sim^{TD}-Funktionsversuchen. So konnten die Wissenschaftler sich ein Bild über die im Testgebiet vorhandene Mobilfunksituation entlang der verschiedenen sim^{TD}-Versuchsstrecken machen.

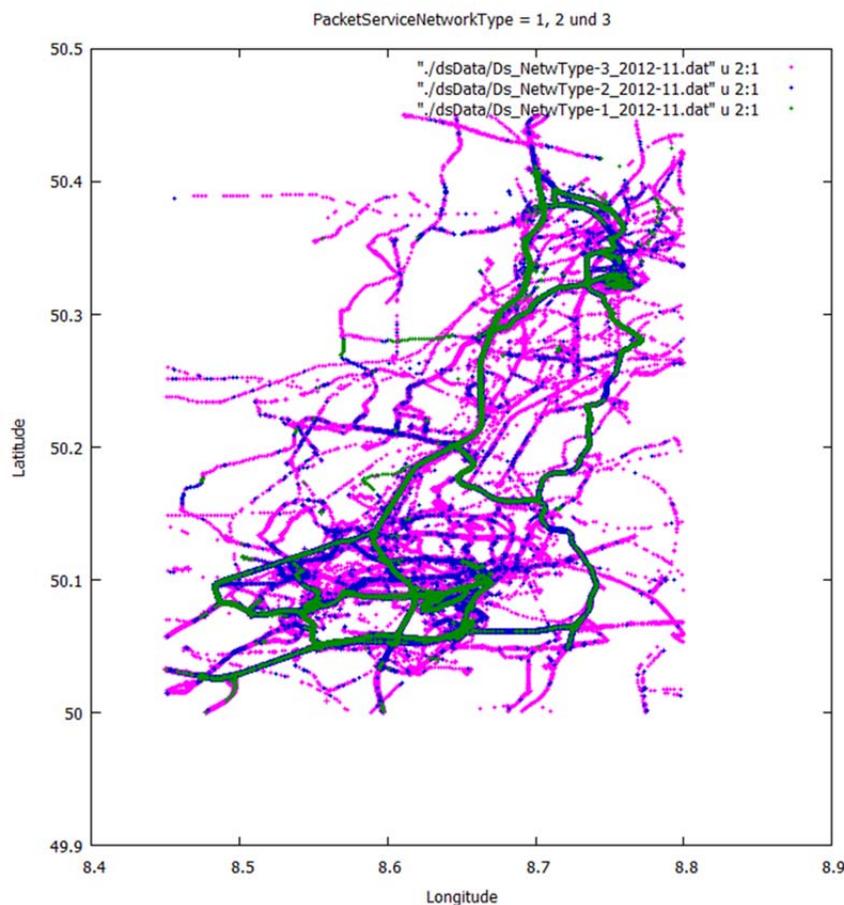


Abbildung 9: Georeferenzierte Verteilung „PacketServiceNetworkType“ für die Mobilfunktechnologien EDGE (grün), UMTS (blau) und HSDPA (rosa) während des sim^{TD}-Feldversuches im November 2012

Die im Feldversuch eingesetzten Modems wurden bereits zum Projektstart 2008 ausgewählt und beherrschten daher noch nicht die neuesten Mobilfunktechnologien wie beispielsweise LTE. Dennoch befanden sich die Mobilfunkmodems zu 93 Prozent im HSDPA-Modus, was eine sehr hohe theoretische Bandbreite von bis zu 7,2 MBit/s ermöglicht. Abbildung 9 zeigt die georeferenzierte Verteilung des PacketServiceNetworkType für den Monat November 2012. Hier ist eine geringe Nutzung von EDGE, eine etwas höhere Verwendung von UMTS und eine sehr hohe Verwendung von HSDPA erkennbar.

Gleichzeitig zeigten über 95 Prozent der Messwerte einen sehr guten Empfangspegel zwischen -40 dBm und -89 dBm (siehe Abbildung 10). Diese Ergebnisse zu Bandbreite und Empfangspegel lassen den Schluss zu, dass die im Testgebiet vorhandene Mobilfunkversorgung mit „sehr gut“ zu bewerten ist [14].

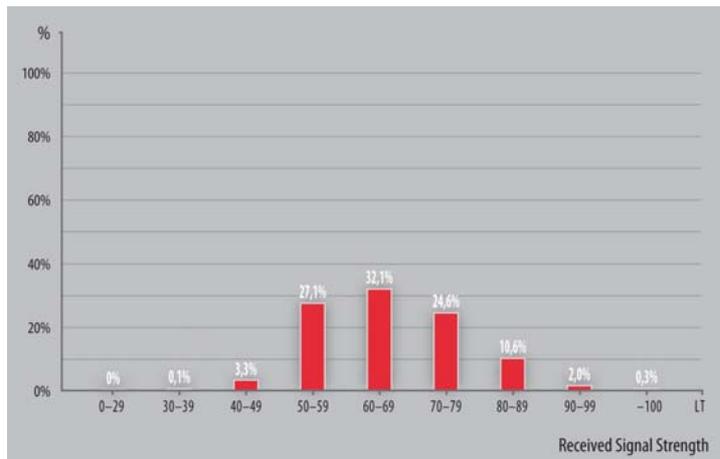


Abbildung 10: Prozentuale Verteilung des Empfangspegels [dBm], hier am Beispiel vom November 2012

Zur Ermittlung der RTT wurde während der Versuchsfahrten eine so genannte Ping-Anfrage an den zentralen Server abgesetzt. Die Auswertung ergab insgesamt gute Werte für die RTT, sie lagen in ca. 80 Prozent der Fälle zwischen 75 und 200 Millisekunden (siehe Abbildung 11). Nur ca. 12 Prozent der Werte lagen zwischen 200 Millisekunden und 4 Sekunden. Die verbleibenden knappen 8 Prozent der Werte resultierten aus ungünstigen Messungen, bei denen auch nach 4 Sekunden keine Antwort zu verzeichnen war.

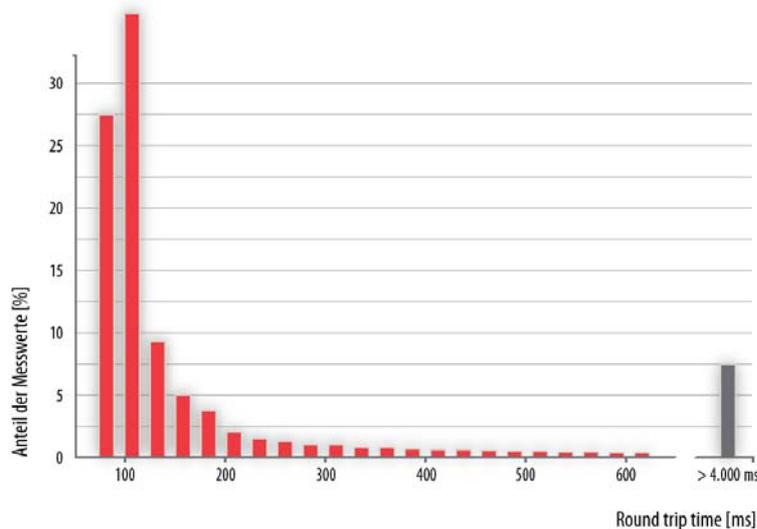


Abbildung 11: Messergebnisse über alle Messungen und alle verwendeten Mobilfunktechnologien (HSDPA, WCDMA, EGPRS).

Die Messungen zeigen sehr gut, dass die erzielbaren Datenübertragungszeiten von Fahrzeug zu Fahrzeug sehr stark von der vorliegenden Mobilfunktechnologie abhängen. So liegen in Gebieten mit guter HSDPA-Versorgung ca. 87 Prozent der Messwerte unter 200 Millisekunden. Ebenfalls ist anhand der Messwerte gut zu erkennen, dass die erzielbaren Werte für die RTT von der tageszeitbedingten Netzlast abhängen (s. Abbildung 12). Die Messungen zeigen auch hier, dass Mobilfunk für nicht-sicherheitskritische sim^{TD}-Funktionen geeignet ist. Dies bestätigt sich auch anhand der Ergebnisse der praktischen Untersuchungen der mit Mobilfunk realisierten Verkehrseffizienzfunktionen [13].

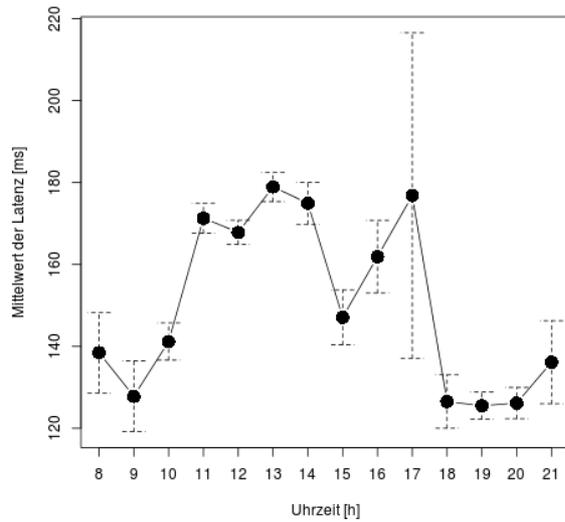


Abbildung 12: Tageszeitverteilung der gemessenen Datenübertragungszeiten im städtischen Bereich des Versuchsgebietes.

Anhand dieser Untersuchungen während des Feldversuches konnte also auch die Eignung von Mobilfunk nachgewiesen werden. Der Feldversuch hat das hybride Konzept zum Einsatz beider Technologien für Car-to-X Kommunikation bestätigt.

Die Anwendung der Car-to-X Kommunikation zur Übermittlung von Informationen aus den Fahrzeugen in die Verkehrszentralen und umgekehrt führte zu einer verbesserten Kenntnis der Verkehrslage und zu einer schnelleren Erkennung verkehrsrelevanter Ereignisse.

Die Verknüpfung von straßenseitiger Infrastruktur mit Fahrzeugen zu einem Kommunikationsverbund verbessert die Möglichkeiten für eine präzise und aktuelle Bereitstellung von Informationen über die Verkehrslage im Straßennetz.

Im DRIVE-Center Hessen wurde die leistungsfähige sim^{TD}-Versuchszentrale, die ITS Central Station (ICS), aufgebaut. Die Verkehrszentrale Hessen (VZH) sowie die Integrierte Gesamtverkehrsleitzentrale (IGLZ) Frankfurt am Main lieferten der sim^{TD}-Zentrale aus ihren Bestandssystemen Verkehrslagedaten. Die sim^{TD}-Funktion *Verkehrslage* fusioniert die Daten in einem neu entwickelten Verfahren mit den dynamisch generierten Verkehrsdaten der Versuchsflotte. So entsteht eine konsistente Darstellung der aktuellen Verkehrslage für das sim^{TD}-Versuchsnetz.

Die sim^{TD}-Verkehrslage erzeugt auf der Grundlage fusionierter Verkehrsdaten aus der VZH und der IGLZ sowie den mit dem sim^{TD}-System ausgestatteten Fahrzeugen eine dynamische Darstellung der Verkehrssituation [15]. Die Ermittlung und Bereitstellung einer präzisen und aktuellen Verkehrslage ist eine wesentliche Voraussetzung für den Betrieb kooperativer Anwendungen. Die fusionierte Verkehrslage wird in Form einer schematisierten Karte als Informationsservice bereitgestellt. So dient sie verschiedenen sim^{TD}-Funktionen als Datengrundlage. Sie ist beispielsweise für das sim^{TD}-Umleitungsmanagement unerlässlich, mit dem Nutzer geeignete Empfehlungen zu Alternativrouten erhalten, sofern auf deren Haupttroute eine Störung vorlag [16].

2.2 Volkswirtschaftliche Relevanz wurde belegt

Bei vollständiger Durchdringung mit Car-to-X Funktionen könnten jährlich bis zu 6,5 Milliarden Euro der volkswirtschaftlichen Kosten von Straßenverkehrsunfällen vermieden werden. Des Weiteren kann ein volkswirtschaftlicher Nutzen von 4,9 Mrd. Euro erzielt werden durch die Reduzierung von Stautunden und die Vermeidung von Umweltbelastungen.

Die Gesellschaft profitiert von der Einführung der sim^{TD}-Funktionen. Es werden Unfälle vermieden und Reisezeiten verkürzt. Dadurch erhöht sich die Fahr- und Verkehrssicherheit. In Verkehrs- und Unfallsimulationen sowie einer Nutzen-Kosten-Analyse konnte sim^{TD} nachweisen, dass durch die Einsparung von Zeit-, Emissions-, Fahrzeugbetriebs- und Kohlendioxidkosten der volkswirtschaftliche Nutzen erhöht werden kann.

Zur Bewertung der Effizienz des sim^{TD}-Systems haben Experten den direkten Einfluss von 13 relevanten Funktionen auf die Fahr- und Verkehrssicherheit untersucht und ein so genanntes Wirkfeld ermittelt. Das Wirkfeld bezeichnet den Anteil an Verkehrsunfällen, bei denen eine Funktion prinzipiell eine Wirkung zeigen könnte. Datengrundlage der Analyse waren die von GIDAS (German In-Depth Accident Study) erhobenen Unfalldaten aus den Jahren 2001 bis 2008. Bei der Analyse stachen die Funktionen *Elektronisches Bremslicht* (Wirkfeld = 14,3 %), *Verkehrszeichenassistent* für Vorfahrtsregelungen (Wirkfeld = 15 %) und *Kreuzungs- und Querverkehrsassistent* (Wirkfeld = 8,9 %) besonders heraus [17].

Da sich die Wirkfelder der Anwendungsfälle teilweise überschneiden, lassen sich die Ergebnisse nicht einfach aufsummieren. Würden alle Funktionen zum Einsatz kommen, so wäre mit einem Potenzial von bis zu 34 % zu rechnen.

Im Anschluss an die Wirkfeldanalysen wurden die drei vielversprechendsten Anwendungsfälle in einer Unfallsimulation untersucht. Die Unfallsimulation basierte auf

Realunfällen aus der GIDAS-Datenbank. Mit einem Simulationsmodell der Verkehrsunfallforschung war es möglich, die Unfalleinlaufphase bis 5 Sekunden vor der Kollision realitätsgetreu nachzubilden. Zur Ermittlung des Systemnutzens haben die Experten die Pre-Crash-Phase in der Unfallsimulation mit und ohne sim^{TD}-Funktion nachgestellt und verglichen.

Aus dem Wirkungsfeld des *Elektronischen Bremslichts* wurden 447 Unfälle simuliert, für den *Kreuzungs- und Querverkehrsassistenten* wurden 450 Unfälle und für den *Verkehrszeichenassistenten* wurden 92 Unfälle an Kreuzungen mit Stoppschildern nachgestellt. Die Unfallsimulation führte unter anderem zu der Erkenntnis, dass mit dem *Kreuzungs- und Querverkehrsassistenten* innerhalb des Wirkungsfelds eine Vermeidung von 66 Prozent der Unfälle mit ernsthaft Verletzten und höherer Verletzungsschwere (MAIS2+-Verletzungen) erwartet werden kann. Die Wirkung der sim^{TD}-Funktionen ist vor allem darauf zurückzuführen, dass Fahrer rechtzeitig informiert werden und dadurch die Fahrer den Sicherheitsabstand vergrößern, die Geschwindigkeit verringern und eher bremsen.

Durch zusätzliche Berücksichtigung der Sachschäden konnte ermittelt werden, dass bei vollständiger Durchdringung mit sim^{TD}-Funktionen jährlich bis zu 6,5 Milliarden Euro der volkswirtschaftlichen Kosten von Straßenverkehrsunfällen vermieden werden können (siehe Abbildung 13).

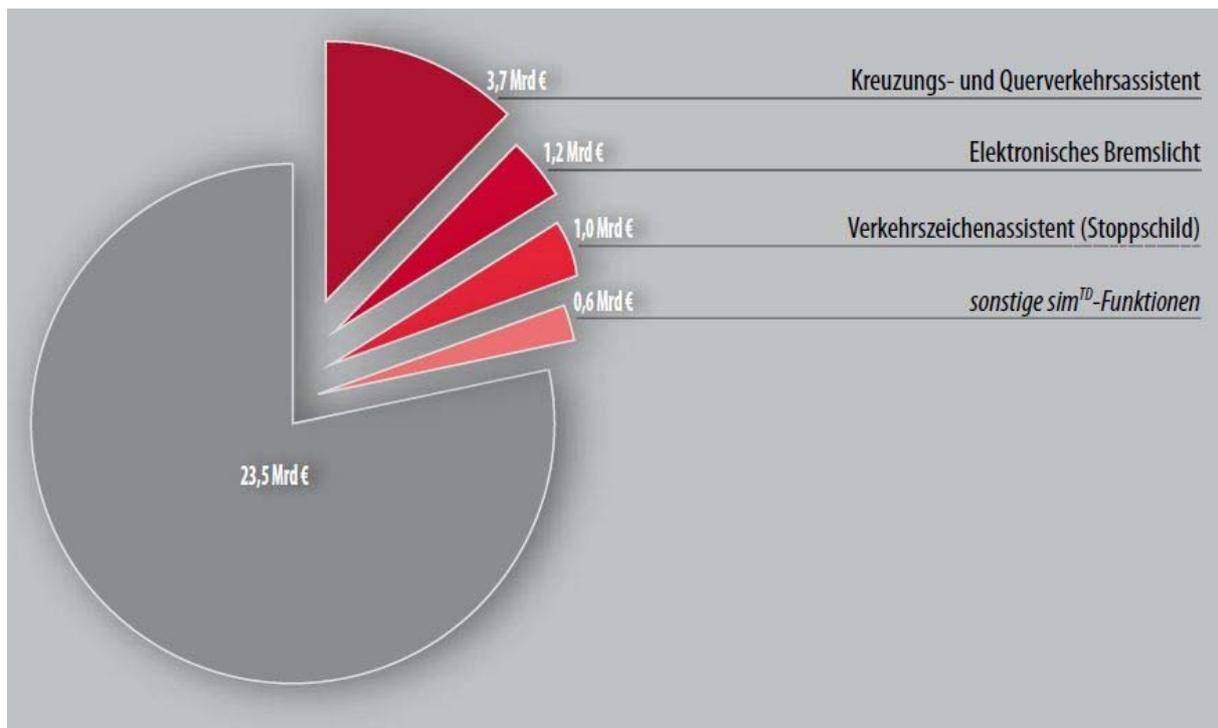


Abbildung 13: Volkswirtschaftliche Kosten von Straßenverkehrsunfällen von insgesamt 30 Milliarden Euro im Jahr 2015 und das Potenzial der sim^{TD}-Funktionen (rot).

Zur Bestimmung der Wirkungen des sim^{TD}-Systems zur Verbesserung der Verkehrseffizienz wurden die Ergebnisse der Verkehrssimulation verwendet. Bezüglich der Verkürzung von Reisezeiten konnte nachgewiesen werden, dass die dynamischen Umfahrungshinweise sowohl die Reisezeit von Fahrzeugen reduzierte, die mit sim^{TD} ausgestattet waren als auch die von nicht ausgestatteten Fahrzeugen (Mitzieh-Effekt). Auch bei Car-to-X Kommunikation an Lichtsignalanlagen konnte ein Effizienzgewinn nachgewiesen werden. Die Analyse ergab, dass bei vollständiger Durchdringung mit sim^{TD}-Funktionen jährlich volkswirtschaftliche Kosten in Höhe von 4,9 Milliarden Euro durch eine Verbesserung der Zeit-, Emissions-, Fahrzeugbetriebs- und Kohlendioxidkosten eingespart werden können.

Unfall- und Verkehrssimulationen ermöglichen die ökonomische Effizienz der sim^{TD}-Funktionen nachzuweisen. Da aufgrund begrenzter finanzieller Mittel der Staat nur die effizientesten Maßnahmen realisieren kann, werden in Deutschland Verkehrsprojekte nach der Methodik des Bundesverkehrswegeplans und den Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (EWS-97) anhand einer Nutzen-Kosten Analyse bewertet. Die Nutzen-Kosten Analyse ist ein international und national anerkanntes Verfahren, um die ökonomische Effizienz einer Maßnahme zu ermitteln. Damit ist es möglich, die volkswirtschaftliche Bedeutung sowie die Dringlichkeit der Umsetzung der sim^{TD}-Funktionen zu beurteilen.

Um den volkswirtschaftlichen Nutzen zu ermitteln, wird die Entwicklung des Unfallgeschehens und der Verkehrsbelastung für das Autobahn- und Stadtstraßennetz bis zum Jahr 2035 ohne sim^{TD}-Funktionen fortgeschrieben. Danach werden mit Hilfe der Ergebnisse aus der Unfallforschung und Verkehrssimulation die Auswirkungen der sim^{TD}-Funktionen auf die Verkehrsunfallentwicklung und die Verkehrseffizienz in Abhängigkeit der Ausstattungsraten in den jeweiligen Jahren über den Zeitraum von 2015 bis 2035 modelliert. Somit ergibt sich die Möglichkeit, Verkehrssicherheit und Verkehrseffizienz für den Fall ohne sim^{TD} und mit sim^{TD}-Funktionen zu beurteilen. Veränderungen in den Zeitkosten, der Fahrzeugbetriebskosten, des Kraftstoffverbrauchs, der Schadstoffemissionen (Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoff, Stickstoffoxide und Partikel) sowie der Kohlendioxid-Emissionen ergeben sich durch die Effizienzfunktionen von sim^{TD}. Die Verkehrssicherheitsfunktionen von sim^{TD} verringern die Anzahl der Unfälle. Dadurch sinkt die Zahl der Verkehrstoten, der Leicht- und Schwerverletzten sowie die Anzahl der Sachschadensunfälle. Bei den nicht vermeidbaren Verkehrsunfällen werden die Verletzungsschwere und die Höhe der Sachschadenskosten verringert. Um die einzelnen Nutzenpositionen summieren zu können, werden die Ressourceneinsparungen nach einer einheitlichen Methodik monetär bewertet.

Bei der Analyse der volkswirtschaftlichen Effizienz von sim^{TD}-Funktionen werden auch die vollständigen Kosten für die Ausstattungen von Fahrzeugen sowie für die Infrastruktur erfasst. Gesamtwirtschaftlich ist sim^{TD} dann vorteilhaft, wenn die Summe des bewerteten Nutzens größer ist als die gesamtwirtschaftlichen Kosten. Ist dies der Fall liegt ein Nutzen-Kosten Verhältnis größer als 1 vor.

2.3 Fahrer wollen Car-to-X Funktionen nutzen

Die Fahrerbefragung im Feldversuch dokumentiert den Wunsch der Fahrer, Car-to-X Funktionen nach Markteinführung zu nutzen. Dabei steht insbesondere ein wahrnehmbarer Mehrwert im Vergleich zu bestehenden Technologien bzw. Services im Vordergrund.

Bereits heute wäre ein Großteil der Probanden bereit, durch anonymisierte Bereitstellung von Fahrzeugdaten zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und -effizienz beizutragen.

Die Nutzerakzeptanz und weitere diese beeinflussende Faktoren untersuchten sim^{TD}-Experten mit so genannten nicht-technischen Versuchen. Um diese Faktoren messbar zu machen, nutzen die Wissenschaftler im Feldversuch zwei Methoden: Die Versuchsfahrer wurden zum einen nach Schulungen und Versuchen zu Gruppeninterviews eingeladen und zum anderen mit Hilfe von Fragebögen zur Systembewertung unmittelbar nach der jeweiligen Fahrt befragt. Im Rahmen dieser Befragungen durften die Fahrer zudem ihre Präferenzen für bestimmte sim^{TD}-Funktionen äußern und definieren, welche Anforderungen die Car-to-X Technologie und deren Funktionen erfüllen müssten, damit sie diese im eigenen Fahrzeug regelmäßig nutzen würden. Auch in der Fahrsimulation wurden die Versuchsfahrer nach Durchfahren des Simulationsparcours um eine Bewertung des sim^{TD}-Anwendungsfalls gebeten.

Die von sim^{TD} gewonnenen Datenmengen aus den Befragungen sind erheblich: Insgesamt nahmen 323 Fahrer an den persönlichen Befragungen mit einer Durchschnittsdauer von 150 Minuten teil. Zudem wurden 6.643 Fragebögen nach den jeweiligen Fahrten ausgefüllt und 120 Fahrer der Fahrsimulation beurteilten durchschnittlich jeweils 30 Minuten lang die sim^{TD}-Funktionen. Aus der Gesamtheit all dieser Untersuchungen ergibt sich ein klares Bild: Die Fahrer wünschen sich zahlreiche sim^{TD}-Funktionen für das alltägliche Fahren. Die Versuchsfahrer erwarten sich durch sim^{TD} eine erhöhte Fahrsicherheit, eine bessere Fahreffizienz und einen höheren Fahrkomfort.

sim^{TD} stellt für die Erhöhung der Fahrsicherheit Funktionen aus der Gruppe *Fahren und Sicherheit* bereit, für Fahreffizienz und Fahrkomfort Funktionen aus den Gruppen *Verkehr* und *Ergänzende Dienste*. Die Ergebnisse der Nutzerbefragung zu den verschiedenen sim^{TD}-Anwendungsfällen lässt eine Bewertung der Car-to-X Technologie auch über sim^{TD} als Forschungsprojekt hinaus zu.

2.3.1 Beispiel Hinderniswarnung.

Aus den Versuchen zur sim^{TD}-Funktion *Hinderniswarnung* wird deutlich, dass Fahrer spezifische Meldungen präferieren, anhand derer sie bereits genau über die bevorstehende Fahrsituation informiert werden. So bevorzugen die befragten Fahrer die spezifische Meldung „Achtung! Tiere auf der Fahrbahn“ gegenüber der nicht-spezifischen Meldung „Achtung! Gefahr!“. Durch letztgenannte Meldung fühlen sich die Fahrer nach eigenen Angaben nicht optimal auf die bevorstehende Situation vorbereitet. Für eine optimale Akzeptanz der Car-to-X Technologie muss also auf die korrekte Detektion des Gefahrentyps Wert gelegt werden. Car-to-X Meldungen haben, wie die Untersuchungen ergaben, eine aufmerksamkeitssteuernde und handlungsvorbereitende Funktion, die von den Fahrern gerne genutzt wird.

Sollten die von den Fahrern gewünschten spezifischen Meldungen falsche Inhalte darstellen, zum Beispiel befinden sich anstelle von Tieren Gegenstände auf der Fahrbahn, empfehlen die Fahrer, lieber unspezifische Meldungen angezeigt zu bekommen. Bei uneindeutigen Informationen sollten Car-to-X Systeme lieber korrekte, aber unspezifische Meldungen anzeigen als inkorrekte, aber spezifische Meldungen. Fehlerhafte Meldungen können laut der Befragungen sonst zur Ablehnung der Technologie führen.

Versuche zur sim^{TD}-Funktion *Elektronisches Bremslicht* auf dem abgeschlossenen Testgelände in Friedberg machten deutlich, dass diese Warnungen von Fahrern als hilfreich empfunden werden, insbesondere bei Ablenkung. Fahrer, welche unmittelbar vor der Warnung abgelenkt waren, bewerteten diese Funktion im direkten Vergleich zu Fahrern, die sich nach eigenen Angaben zum Zeitpunkt der sim^{TD}-Warnung auf die Fahrsituation konzentrierten, deutlich positiver.

Das Potenzial der Car-to-X Kommunikation kommt insbesondere unter nicht-optimalen Aufmerksamkeitsbedingungen der Fahrer zur Geltung.

2.3.2 Kaufbereitschaft.

Insgesamt zeigten die Versuchsfahrer eine hohe Kaufbereitschaft für neuartige Car-to-X Funktionen. So gehört die sim^{TD}-Funktion *Ampelphasenassistent* neben der *Warnung vor Stauende* und dem *Elektronischen Bremslicht* zu den drei Funktionen mit der höchsten Nutzerakzeptanz und Kaufbereitschaft. Diese sim^{TD}-Funktionen wurden von den Fahrern gehäuft in den persönlichen Befragungen als Funktionen beschrieben, die unbedingt Teil des Car-to-X Systems sein sollten.

In den Diskussionen zu den sim^{TD}-Funktionen wurde deutlich, warum diese Anwendungsfälle eine dermaßen hohe Zustimmung von den Fahrern erhielten: Diese Funktionen werden durch bestehende Technologien und Dienste noch nicht angeboten und stellen daher eine deutlich wahrnehmbare Innovation dar. Für die Nutzer von Car-to-X Technologie steht der Mehrwert im Vergleich zu bestehenden Technologien und Diensten im Vordergrund.

Bereits heute wäre ein Großteil der Probanden bereit, durch anonymisierte Bereitstellung von Fahrzeugdaten zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und -effizienz beizutragen.

Die Einführung von Car-to-X Technologien wird häufig von Diskussionen zum Schutz der Privatsphäre begleitet: Ohne entsprechende Sicherheitsmaßnahmen kann durchaus die Gefahr bestehen, dass, basierend auf den von den Fahrzeugen übertragenen Daten, Fahrprofile erstellt werden. Die befragten Versuchsfahrer teilen diese Sorgen jedoch in weiten Teilen nicht. 71 % der Versuchsfahrer sind bereit, durch die anonymisierte Bereitstellung von Fahrzeugdaten zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und -effizienz beizutragen. Voraussetzung sind allerdings effektive Datenschutz- und Privatsphäreschutz-Technologien, die die Erstellung von individualisierten Bewegungs- und Geschwindigkeitsprofilen verhindern.

2.4 sim^{TD} unterstützt Markteinführung kooperativer Systeme

Die Ergebnisse aus sim^{TD} unterstützen bei der Markteinführung der Car-to-X Technologie. Als erste Anwendungen im Rahmen einer öffentlich-privaten Kooperation ist die Baustellenwarnung in Verbindung mit einer Verkehrslageerfassung im Umfeld von Baustellen im Eurokorridor Rotterdam – Frankfurt am Main – Wien vorgesehen, die bereits bei geringen Ausstattungsraten einen für den Fahrer erlebbaren Nutzen und einen Sicherheitsgewinn für das Baustellenpersonal erwarten lässt.

Bei der Markteinführung der Car-to-X Technologie müssen Privatwirtschaft und öffentliche Hand von Anfang an zusammenarbeiten, damit schon in der frühen Einführungsphase ein Nutzen erlebbar wird. Dazu statten Automobilhersteller und Straßenbetreiber Fahrzeuge und straßenseitige Infrastruktur mit ITS G5 und Mobilfunksystemen aus. Die straßenseitige Infrastruktur wird in ein Verkehrsmanagementsystem eingebunden. Im Einführungszenario wird davon ausgegangen, dass neben der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation basierend auf ITS G5 auch eine Kommunikation zwischen Fahrzeugen und einer straßenseitigen Infrastruktur stattfindet, den so genannten ITS Roadside Stations (IRS). In Deutschland sind die Fahrzeughersteller, das Bundesverkehrsministerium, die Bundesanstalt für Straßenwesen und die Straßenbetreiber gleichermaßen als treibende Kraft bei der Einführung von Car-to-X Systemen und deren Integration in Verkehrszentralen beteiligt.

Fahrzeuge kommunizieren darüber hinaus mittels Mobilfunk mit einem Backend. Ein solches hybrides Kommunikationsmodell wird als das erfolgversprechendste angesehen, da es die Vorteile beider Technologien vereint. Im Nahbereich erfordern die oft sicherheitsrelevanten Anwendungen sehr geringe Latenzen und hohe Wiederholungsraten. Diese Anforderungen können mit ITS G5 bewältigt werden, da die Kommunikationsarchitektur darauf ausgelegt wurde und insbesondere durch direkte Kommunikation charakterisiert ist. Für Funktionen vor allem aus dem Bereich Fahr- und Verkehrseffizienz werden Informationen über Situationen benötigt, die räumlich und zeitlich weiter entfernt sind. Die Anforderungen der Kommunikation über weite Distanz ohne hohe Anforderungen an Wiederholrate und Latenz werden auch von heutiger Mobilfunktechnologie erfüllt. Mit der Weiterentwicklung bezüglich der geografischen Adressierung birgt sie sogar noch weiteres Potenzial.

Die Kombination beider Kommunikationstechnologien erfüllt die Voraussetzungen für eine zuverlässige Datenübermittlung für die unterschiedlichen Anforderungsprofile. Die Einführung von Car-to-X Systemen kann über Funktionen erreicht werden, die Nutzer in konkreten Situationen zuverlässig erleben und die im Vergleich zu existierenden Marktlösungen einen erkennbaren Mehrwert bieten. Die gemeinsame Einführung von Car-to-X Systemen durch private und öffentliche Akteure macht die drei sim^{TD}-Funktionen *Lichtsignalanlagensteuerung*, *Einsatzfahrzeugwarnung* und *Baustellenwarnung* bereits in der frühen Markteinführungsphase für den Nutzer erlebbar.

2.4.1 Hybride Kommunikation

Werden Mobilfunk- und ITS G5 Kommunikation in einem hybriden Übertragungssystem genutzt, können die Vorteile beider Technologien vereint werden.

ITS G5. Für sicherheitsrelevante sim^{TD}-Funktionen, beispielsweise für LSA-Funktionen oder Funktionen für zukünftiges, kooperierendes Fahren, ist eine Kommunikation in Echtzeit zwingend notwendig. Dies bedeutet, dass im Nahbereich für die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen nur sehr geringe Latenzen bestehen dürfen. Die angesprochenen Funktionen erfordern das Senden von Nachrichten mit hoher Häufigkeit. Diese Anforderungen können am besten mit ITS G5 erfüllt werden.

Mobilfunk. Die sim^{TD}-Funktionen aus dem Bereich der Fahr- und Verkehrseffizienz basieren hingegen auf Informationen über Situationen, die räumlich und zeitlich weiter entfernt sind, wie etwa ein Stauende, welches einige Kilometer vorausliegt. Hier erfolgt eine Übertragung von Informationen über größere Distanzen und eine zentrale Datenaufbereitung, bei der Daten und Informationen aus verschiedenen Quellen aggregiert werden – zum Beispiel Floating Car Data und Messstellen der Straßeninfrastruktur.

Die Anforderungen für diese Effizienzfunktionen können neben der WLAN basierten ITS G5 Kommunikationstechnologie auch von heutigen Mobilfunktechnologien der zweiten und dritten Generation erfüllt werden. Die Mobilfunktechnologien der Zukunft, allen voran LTE, lassen zum Beispiel durch die erwartete Weiterentwicklung bezüglich einer geografischen Adressierung, weiteres Potential erkennen.

Hybride Kommunikation. Die Kombination beider Kommunikationstechnologien erfüllt die Voraussetzungen für eine zuverlässige Datenübermittlung für die unterschiedlichen Anforderungsprofile. Sind Sende- und Empfangsgeräte beider Kommunikationsarten in den Fahrzeugen an den Fahrzeugbus angeschlossen, so bietet die hybride Kommunikation eine umfassende Lösung.

2.4.2 Rahmenbedingungen

Die reinen Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Funktionen, welche allein durch die Automobilhersteller eingeführt werden könnten, sind stark von der Ausstattungsrate mit Car-to-X Systemen abhängig. Schätzungen zufolge kann in den ersten Jahren nach Markteinführung nur mit geringen Ausstattungsraten von Car-to-X Systemen gerechnet werden (siehe Abbildung 14).

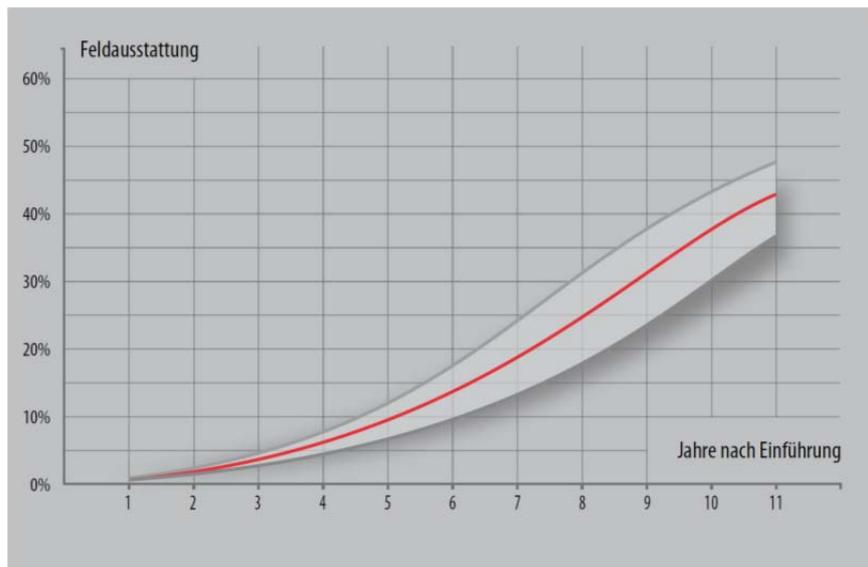


Abbildung 14: Abschätzung der Entwicklung der Car-to-X Feldausrüstung über Zeit nach Jahren der Einführung.

Diese Ausstattungsdaten sind zu gering, um bei einer reinen Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation Car-to-X Funktionen realisieren zu können, die eine zuverlässige Erlebbarkeit bereits für die ersten Nutzer ermöglicht. Eine Einführung von Car-to-X Funktionen, die allein auf Basis einer Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation beruht, wird aufgrund einer zu langsamen Überwindung des Netzeffektes – ein Netzeffekt liegt dann vor, wenn bei jedem neu hinzukommenden Teilnehmer der Nutzen bei den bereits ausgestatteten Teilnehmern steigt – keinen Erfolg haben. Um die Erfolgsaussichten von Car-to-X Systemen zu maximieren, wurden im sim^{TD}-Projekt Bedingungen aufgestellt, die für eine erfolgreiche Car-to-X Systemeinführung notwendig sind.

Überwindung des Netzeffektes. Bei reinen Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Funktionen ist der Mehrwert für den einzelnen Anwender in starkem Maße von der Anzahl der Nutzer abhängig. Dies gilt besonders in der Einführungsphase, in der zunächst eine geringe Ausstattungsrate von Car-to-X Systemen existiert. Viele Funktionen sind erst ab einer Mindestausstattungsrate so erlebbar, dass mit einer Kundenakzeptanz gerechnet werden kann.

Frühe Erlebbarkeit. Um den Kauf von Komponenten zur Car-to-X Kommunikation vom ersten Tag der Markteinführung an für den Kunden attraktiv zu machen, muss der Mehrwert des Systems bereits ab dem ersten Nutzer erlebbar sein. Dies erfordert Funktionen, bei denen der Netzwerkeffekt sehr schnell überwunden wird und der Nutzer in konkreten Situationen zuverlässige Funktionen erlebt, die im Vergleich zu existierenden Marktlösungen einen erkennbaren Mehrwert bieten.

Schnelle Flächendeckung. Da für Kunden regionale Insellösungen nur eingeschränkt und in einer Übergangszeit akzeptabel sind, ist bei der Car-to-X Einführung eine schnelle flächendeckende Verfügbarkeit erster Anwendungen wichtig.

Geringe Investitionskosten. Aufgrund der mit der Car-to-X Einführung verbundenen Investitionsrisiken sollte der erforderliche Ressourceneinsatz zu Beginn der Implementierung sowohl für die Privatwirtschaft als auch für die öffentliche Hand möglichst überschaubar sein.

Geringe technische und organisatorische Komplexität. Zur Begrenzung des technischen und wirtschaftlichen Risikos sollte bei der Markteinführung der Car-to-X Technologie der Fokus zunächst auf wenigen Funktionen liegen, die einen erkennbaren Mehrwert und eine nachweisliche Wirkung auf den Verkehr haben und gleichzeitig technisch und organisatorisch einfach beherrschbar sind. Komplexere Funktionen sollten später folgen, wenn zum Beispiel die für sie kritische Mindest-Ausstattungsrate an Car-to-X Systemen im Feld erreicht ist.

Nutzen-Kosten-Verhältnis >> 1. Die Einführung von Car-to-X Funktionen mit Beteiligung der öffentlichen Hand erfordert einen volkswirtschaftlichen Nutzen, der die Investitions- und Betriebskosten des Systems übersteigt. Dies könnte beispielsweise durch die Vermeidung von Staus und Unfällen erreicht werden.

Vision für die Weiterentwicklung der Car-to-X Technologie und Funktionen. Die Motivation für die Markteinführung der Car-to-X Technologie ist die Verbesserung von Sicherheit und Effizienz im Straßenverkehr und langfristig die Ausschöpfung des vollen Potenzials des volkswirtschaftlichen Nutzens. Die Weiterentwicklung der Car-to-X Technologie und der Funktionen sollten für die Kunden attraktiv und von hohem Nutzen sein. Diese Vision bedarf der kurz- und mittelfristigen Verwirklichung sämtlicher sim^{TD}-Funktionen und umfasst langfristig die Stärkung des kooperativen Fahrens, bei dem sich Fahrzeuge im Nahbereich untereinander über ihre Fahrstrategien abstimmen.

2.4.3 Ausbau von Lichtsignalanlagen (LSA).

Die innerstädtischen Anwendungsfälle könnten den Aufbau eines kooperativen Car-to-X Netzes fördern, weil die ITS G5-Lösung sofort erlebbar ist und damit zu einer hohen Kundenakzeptanz führt. Das Risiko der strategischen Investitionen der Privatwirtschaft verringert sich dadurch stark. Als Einstieg bei der Einführung der ITS G5-Technologie ist die Priorisierung des öffentlichen Verkehrs im städtischen Bereich besonders geeignet, weil es sich um eine Substitution einer bestehenden Technologie handelt und, Wirtschaftlichkeit vorausgesetzt, im Rahmen von Ersatzinvestitionen eingeführt werden kann. Mit dem Ausbau von ITS G5 können sich Städte und Regionen unabhängig voneinander entwickeln und zahlreiche LSA-Funktionen einführen. Eine Stadt oder Region entscheidet – je nach Zuständigkeit – über die Einführung kooperativer Verkehrssysteme. Für die Bewohner wird die Car-to-X Technologie sofort erlebbar. Der *Netzeffekt* kann so zunächst in Ballungsräumen überwunden werden.

2.4.4 Einsatzfahrzeugwarnung.

Car-to-X Fahrzeuge erhalten eine Warnung mit Richtungsangabe und Entfernung, wenn sich ein Einsatzfahrzeug nähert. Die *Einsatzfahrzeugwarnung* setzt nur die Ausrüstung der Einsatzfahrzeuge mit Car-to-X Technologie voraus. Ab dem ersten Tag der Markteinführung ist diese Funktion sofort erlebbar und unterliegt nicht dem Netzeffekt. Der Komfort steigt, da der Fahrer früher und umfassender informiert wird; die Sicherheit steigt sowohl für den Fahrer als auch für die Einsatzkräfte. Ausgestattet werden könnten Fahrzeuge der Polizei, der Feuerwehren sowie der Rettungs- und Hilfsdienste. Zur Erreichung einer schnellen Erlebbarkeit sollte die Ausrüstung mit Fahrzeugflotten beginnen, die vergleichsweise kurze Zyklen für die Ersatzbeschaffung haben.

2.4.5 Baustellenwarnung.

Die sim^{TD}-*Baustellenwarnung* eignet sich besonders für Tagesbaustellen auf Autobahnen und Bundesstraßen. Die technische Voraussetzung für diese Funktion ist die Ausstattung der im Baustellenbereich eingesetzten fahrbaren Absperrtafeln mit IRS. Diese warnen dann den sich annähernden Verkehr über ITS G5 und kommunizieren mittels Mobilfunk mit einer kooperativen Verkehrszentrale. Zusätzlich kann eine IRS die gesendeten Zustandsinformationen (Cooperative Awareness Messages, CAM) von Fahrzeugen in ihrer Umgebung aufzeichnen, vorverarbeiten und der kooperativen Verkehrszentrale für eine Verkehrslageermittlung zur Verfügung stellen. Die Baustellenwarnung kann in relativ kurzer

Zeit flächendeckend eingeführt werden und unterliegt daher nicht dem Netzeffekt. Die sofortige Erlebbarkeit des Dienstes führt zu einer schnellen Akzeptanz dieser Car-to-X Funktion.

Mit zunehmender Ausstattung von Fahrzeugen erhöht sich die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer und des Baustellenpersonals. Die verhältnismäßig geringe Anzahl der dafür notwendigen IRS ermöglicht nicht nur eine schnelle Ausstattung aller Sperranhänger, sondern auch ein geringes Investitionsrisiko für die Straßenbetreiber. Die Verkehrslage im Umfeld von Baustellen ist für die Steuerung des Verkehrs von großer Bedeutung. Die Ausstattung der Baustellen mit Car-to-X Technologie ermöglicht die Erfassung der Verkehrslage in diesem Bereich und leistet einen wertvollen Beitrag zur Verbesserung der Verkehrslageinformation und damit zum Verkehrsmanagement.

2.4.6 Car-to-X Markteinführung im Cooperative ITS Corridor Rotterdam – Frankfurt am Main – Wien.

Deutschland, die Niederlande und Österreich haben gemeinsam mit Partnern aus der Industrie die Arbeiten zur schrittweisen Einführung kooperativer Systeme in Europa gestartet. Ab 2015 soll im Cooperative ITS Corridor Rotterdam – Frankfurt am Main – Wien die straßenseitige Infrastruktur auf Autobahnen in Verbindung mit der Ausstattung erster Fahrzeuge durch die Automobilindustrie Wirklichkeit werden. Dabei stehen die beiden Pilotanwendungen *Baustellenwarnung* und *Verkehrslage im Umfeld der Baustelle* im Fokus. Die Einführung des Korridors geschieht in enger Abstimmung mit der Industrie und den EU-Mitgliedstaaten Niederlande, Deutschland und Österreich, die dazu ein Memorandum of Understanding unterzeichnet haben. Parallel dazu haben sich Automobilhersteller und deren Industriepartner im Rahmen des Car 2 Car Communication Consortiums ebenfalls in einem Memorandum of Understanding darauf verständigt, ab 2015 Car-to-X Anwendungen in Serie einzuführen.

Die Erstanwendungen erhöhen die Verkehrssicherheit und schaffen die Grundlage für einen verbesserten Verkehrsfluss. Durch die Zusammenarbeit von Automobilindustrie, Mobilitätsdienstleistern und Infrastrukturbetreibern werden kooperative Systeme für den Kunden vom ersten Tag an erlebbar.

sim^{TD} hat die Standardisierung der Car-to-Car Nachrichtenformate und der Schnittstellen zur Lichtsignalsteuerung vorangetrieben.

Das Projekt sim^{TD} lässt erstmalig die Lichtsignalanlagensteuergeräte und die ITS Roadside Stations (IRS) über eine Open Traffic Systems 2 (OTS 2)-Verbindung kommunizieren. Die sim^{TD}-Experten erweiterten die bereits spezifizierte Schnittstelle für den Einsatz von Fahrzeug-zu-Infrastruktur Kommunikation und leisteten damit einen wichtigen Beitrag für die Standardisierung von Schnittstellen im Bereich von Lichtsignalanlagen. Die Standardisierungsaktivitäten der ETSI bilden einen wichtigen Grundpfeiler für die sichere und nachhaltige Einführung der Car-to-X Technologie in Europa. Bisher hat sich die ETSI in ihren Standardisierungsbemühungen auf die Festlegung von Protokollstandards der Facility-, Transport- und Netzwerkebenen, wie Geonetworking, CAM und DENM, konzentriert [18].

Die für den sim^{TD}-Prüfstand entwickelten Testszenarien wurden bei der Standardisierungsbehörde ETSI als Grundlage für die Entwicklung von Konformitäts- und Interoperabilitätsprüfungen eingebracht.

Eine sichere und interoperable Infrastruktur muss zusätzlich auch die Interaktion auf Applikationsebene vereinheitlichen, um ein sicheres und effektives Zusammenspiel der verteilten Car-to-X Funktionen über Fahrzeug- und Infrastrukturgrenzen hinweg zu ermöglichen. Die erfolgreiche Prüfung von Standardkonformität und Interoperabilität ist eine entscheidende Voraussetzung für die Einführung von Car-to-X Technologie und ihren europaweiten Einsatz. Der sim^{TD}-Prüfstand und die sim^{TD}-Referenztests dokumentieren erfolgreiche Ansätze für Tests auf Basis funktionspezifischer Szenarien. Diesen Erfahrungsschatz hat das Projekt sim^{TD} der ETSI für weiterführende Standardisierungsaktivitäten zur Verfügung gestellt.

Mit der Übergabe der sim^{TD}-Referenztests an die ETSI unterstützt sim^{TD} aktiv die Standardisierungsbemühungen und gestaltet zukünftige Standards und Richtlinien mit. Die Beiträge nationaler und internationaler Forschungsprojekte zur Standardisierung fördern Synergien und führen zu einer nachhaltigen Konsolidierung von Forschungsergebnissen. Die sim^{TD}-Referenztests können über das Projekt hinaus längerfristig bis auf europäische Ebene verbreitet und genutzt werden.

Resümee

Für die weitere Vertiefung sei auf die im Text genannten und im nachfolgenden Literaturverzeichnis aufgeführten Dokumente verwiesen.

Literaturverzeichnis

- [1] Deliverable D5.5 Teil B-3 Technische Bewertung, Abschnitt 3.5
- [2] Deliverable D5.5 Teil B-3 Technische Bewertung, Kapitel 6
- [3] Deliverable D21.2 Konsolidierter Systemarchitekturentwurf, Abschnitt 3.1
- [4] Deliverable D21.2 Konsolidierter Systemarchitekturentwurf, Abschnitt 3.2
- [5] Deliverable D21.2 Konsolidierter Systemarchitekturentwurf, Abschnitt 3.2.4.3
- [6] Deliverable D21.2 Konsolidierter Systemarchitekturentwurf, Abschnitt 3.1.1
- [7] Deliverable D5.5 Teil B-3 Technische Bewertung, Abschnitt 3.2
- [8] Deliverable D5.5 Teil B-3 Technische Bewertung, Abschnitt 3.2.7.1
- [9] Deliverable D5.5 Teil B-3 Technische Bewertung, Abschnitt 3.2.7.8
- [10] Deliverable D5.5 Teil B-3 Technische Bewertung, Abschnitt 3.2.7.2
- [11] Deliverable D5.5 Teil B-3 Technische Bewertung, Abschnitt 3.2.7.7
- [12] Working Paper W43.2 Kommunikationsversuche Auswertung
- [13] Working Paper W43.2 Kommunikationsversuche T_KOM_20_K0200
- [14] Working Paper W43.2 Kommunikationsversuche T_KOM_16, T_KOM_17
- [15] Deliverable D5.5 Teil B-3 Technische Bewertung, Abschnitt 2.2
- [16] Deliverable D5.5 Teil B-3 Technische Bewertung, Abschnitt 2.6
- [17] Deliverable D5.3 Teil 2 Unfalldatenanalyse
- [18] Deliverable D5.5 Teil B-3 Technische Bewertung, Abschnitt 3.6