

Mit Car-to-X in die Zukunft

Kommunizierende Autos für automatisierte kooperative Fahrmanöver

Von Falko Dressler
und Christoph Sommer



Prof. Dr.-Ing. habil. Falko Dressler studierte und promovierte an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Von 2011–2014 leitete er den Lehrstuhl für Technische Informatik an der Universität Innsbruck. Seit 2014 ist er Professor in Paderborn und Leiter des Lehrstuhls für Verteilte Eingebettete Systeme. Forschungsgebiete sind adaptive Drahtloskommunikation, Selbstorganisationsmethoden und Eingebettete Systeme. Anwendungen reichen von Ad-Hoc- und Sensornetze, Fahrzeugkommunikation, industrieller Vernetzung bis hin zur Kommunikation in der Nanotechnologie.

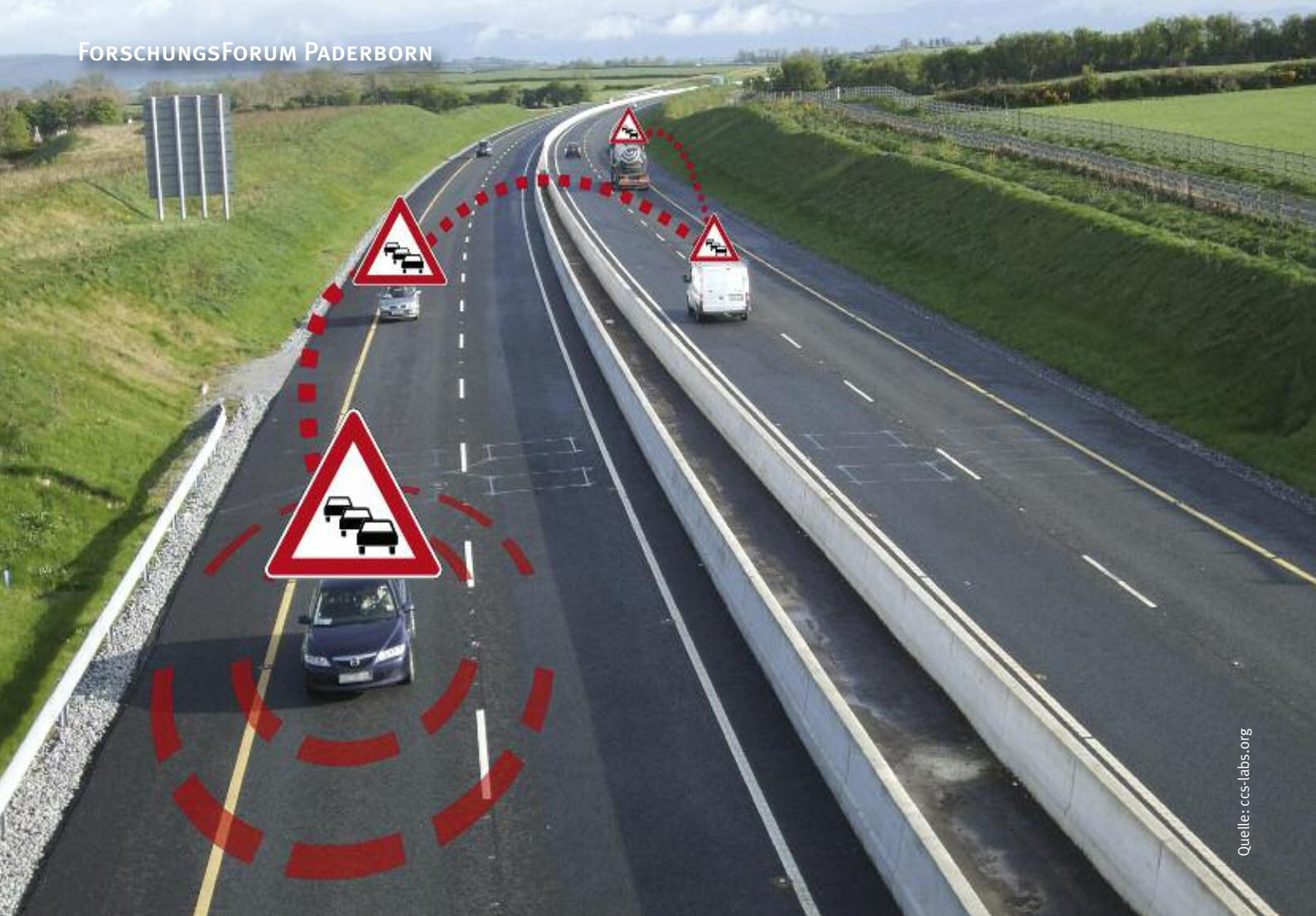
Man könnte flapsig sagen, die Welt drehe sich immer schneller. Gerade im Automobilsektor gab es durch Fortschritte in der Elektronik in den letzten 30 Jahren einen Generationswechsel – und der nächste steht bereits vor der Tür. Die Schlüsseltechnologie heißt Fahrzeugkommunikation (oder auch Car-to-X, kurz C2X). Damit ist einerseits gemeint, dass sich Autos untereinander unterhalten, z. B. über Bremsmanöver oder Staus. Ebenso schließt die Fahrzeugkommunikation aber auch den Informationsaustausch mit der Umgebung, in der sich das Fahrzeug aufhält, ein, wobei etwa Ampelschaltzeiten oder Warnhinweise übermittelt werden. Dank solcher Kommunikation kann sowohl die Verkehrssicherheit erhöht als auch ökonomischer gefahren werden. C2X stellt somit einen Quantensprung in der Automobiltechnik dar. Am Lehrstuhl für Verteilte Eingebettete Systeme werden verschiedene Technologiebausteine für C2X erforscht und weiterentwickelt. Schwerpunkte liegen auf der Einhaltung von Echtzeitbedingungen und der Erhöhung der Zuverlässigkeit der drahtlosen Übertragung. Dabei stehen neben dem Entwurf von C2X-Protokollen, also Regeln für diesen Informationsaustausch, insbesondere zukünftige Anwendungen wie das automatisierte kooperative Kolonnenfahren auf dem Programm.

Mehr Effizienz und Sicherheit im Straßenverkehr

Anwendungen für den drahtlosen Informationsaustausch zwischen Autos gibt es viele [1]. Einige

sind uns aus dem Alltag nicht nur bekannt, sondern schon so vertraut, dass wir sie nicht mehr missen möchten. Dazu gehören insbesondere Verkehrsinformationssysteme und sogenannte Fahrerassistenzsysteme (Advanced Driver Assistance Systems, ADAS). Das „Navi“ ist in den meisten Neuwagen bereits Standard und es gibt viele Nachrüstsysteme auf dem Markt. So richtig ausreizen lässt sich die Funktionalität aber erst, wenn das System permanent mit aktuellen Stauinformationen gefüttert wird. Dies geschieht etwa über herkömmlichen Rundfunk per TMC (Traffic Message Channel) bzw. Navteq Traffic (ehemals TMCpro) oder über eine aktive Mobilfunkverbindung. Hier empfängt das System permanent neue Verkehrsinformationen und kann diese für Routenanpassungen bedingt durch die aktuelle Straßenlage nutzen. Einen Schritt weiter gehen Ideen, innerstädtisch grüne Wellen zu realisieren, indem Lichtsignalanlagen aktiv ihre Schaltzyklen mittels Fahrzeugkommunikation an die Autos übertragen. Erste Pilotversuche gab es bereits in den 1970er-Jahren mit der Wolfsburger Welle. Jedoch sind die Kommunikationstechnologien erst heute ausgereift genug, diese Ideen wieder aufzugreifen. Neuere Pilotversuche wie in Ingolstadt und München zeigen, dass ein erhebliches Potenzial in dieser Technologie liegt – Ergebnisse der Studien zeigen deutliches Einsparpotenzial in Bezug auf Verbrauch und CO₂-Ausstoß und vor allem bei der Reisezeit.

Aktuelle Fahrerassistenzsysteme nutzen primär im Auto verbaute lokale Sensoren. Das geht weit



Quelle: ccs-labs.org

Abb. 1: Illustration des Car-2-X-Informationsaustauschs.

über die üblichen Radar- und Ultraschall-basierten Abstandsmessungen hinaus: neu sind Lidar, also ein 360°-Radar, Stereokameras und vieles mehr. Voll entfalten können die Fahrerassistenzsysteme ihr Potenzial allerdings erst, wenn auch Informationen von anderen Fahrzeugen in die Berechnungen aufgenommen werden. So kann Radar oder eine Kamera eben nicht „um die Ecke gucken“ oder durch ein vorausfahrendes Fahrzeug hindurch sehen – mit drahtloser Fahrzeugkommunikation ist das kein Problem. Diese Trends gipfeln heute in zukünftigen Visionen teil- bzw. vollautomatisierter Fahrzeuge. Erst durch Fahrzeugkommunikation können sich diese untereinander koordinieren, Kolonnen (Platoons) bilden oder koordiniert automatisch Unfälle vermeiden.

Grundlagen moderner Fahrzeugkommunikation

Die gemeinsame Grundlage für alle Formen von Fahrzeugkommunikation sind Technologien zur drahtlosen Übertragung von Informationen. Die sicherlich bekannteste dieser Technologien ist das WLAN (Wireless LAN), das längst unsere Laptops und Smartphones im Wohnzimmer wie im Hotelzimmer mit dem Internet verbindet. Voraussetzung dafür ist jedoch ein WLAN-Hotspot in Reichweite. Dies ist leider – wie z. B. von Urlaubsreisen bekannt – eher selten der Fall. Auch dauert der Verbindungsaufbau in klassischen WLANs derart

lange, dass diese zunächst nicht als Basis für Kommunikation zwischen zwei Autos in Frage kommen konnten, da diese gerade in Städten oft nur für Bruchteile von Sekunden in Funkkontakt stehen können.

Frühe Fahrzeugkommunikationssysteme bauten deshalb auf Mobilfunktechnologien wie GSM, UMTS oder LTE auf. Die Vorteile liegen auf der Hand: Wer Mobilfunkempfang hat, der hat unmittelbar Zugriff auf das Internet und damit jeden erdenklichen Dienst, etwa zum Abruf von digitalem Kartenmaterial und Verkehrsinformationen. Problematisch wird es, wenn zu viele Kunden gleichzeitig das Mobilfunknetz nutzen wollen (Stichwort Silvester, genauso aber auch bei Stau auf der Autobahn). Nun werden Datenübertragungen teils um Sekunden bis Minuten verzögert – und ohne Mobilfunkabdeckung ist die Datenübertragung selbst zum unmittelbaren Hintermann nicht mehr möglich. Damit sind Mobilfunktechnologien keine geeignete Basis für sicherheitsrelevante Anwendungen, in denen es auf Sekundenbruchteile bei der Reaktion ankommt.

In modernen Fahrzeugkommunikationssystemen kommt mit IEEE 802.11p eine Variante von WLAN zum Einsatz, die speziell für Fahrzeugkommunikation entwickelt wurde: Sie sendet auf einem von mehreren Kanälen in einem exklusiv für Fahrzeugkommunikation reservierten Frequenzband um

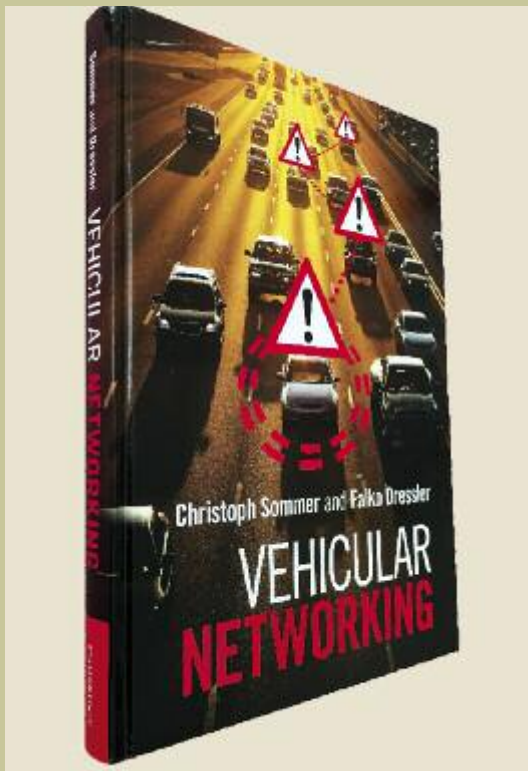


Abb. 2: Das Lehrbuch Vehicular Networking ist im Dezember 2014 bei Cambridge University Press erschienen.

Quelle: Cambridge University Press

5.9 GHz und kommt ohne zeitaufwändigen Verbindungsaufbau aus.

Neue Entwürfe von Fahrzeugkommunikationssystemen gehen noch einen Schritt weiter und setzen daher auf eine Konvergenz von Mobilfunk der neuesten (und zukünftigen) Generationen mit WLAN. Solche heterogenen Fahrzeugnetze [2] sind in der Lage, die Vorteile beider Technologien zu vereinen: So können etwa Cloud-Dienste im Internet über eine Mobilfunkverbindung genutzt werden, während ein System zur Unfallvermeidung mit seiner unmittelbaren Umgebung über IEEE 802.11p-basiertes WLAN kommuniziert.

Forschung in Paderborn

Es sind solche Fragen im Kontext der Fahrzeugkommunikation, zu der der Lehrstuhl für Verteilte Eingebettete Systeme an der Universität Paderborn Grundlagenforschung betreibt. Im Folgenden sollen beispielhaft vier Forschungsfelder vorgestellt werden, in denen die hiesige Arbeitsgruppe international besonders ausgewiesen ist.

Kanalzugriff/Beaconing

Ein erster Schwerpunkt der Arbeit besteht darin, neue Protokolle zu erarbeiten. Viele C2X-Anwendungen basieren auf periodisch ausgetauschten Broadcastnachrichten (Beacons). Als Basis wird das IEEE 802.11p-Protokoll genutzt, welches – ähnlich wie WLAN – einen verteilt koordinierten Kanalzugriff auf die drahtlose Kommunikationsschnittstelle realisiert. Bei wenigen Fahrzeugen in Übertragungreichweite ist das kein Problem. Kritisch wird es, wenn es sehr viele Autos gibt, die

beim Zugriff auf den drahtlosen Kanal wetteifern. Hier kommt es – wieder ähnlich wie bei WLAN – zu Überlast und damit zu Kollisionen von Radiopaketen. Dies wurde konzeptionell untersucht und durch neue Protokollverfahren gelöst. Beispielhaft sei das Dynamic Beaconing-Protokoll genannt [3], welches durch kontinuierliche Abschätzung der Kanallast und der Anzahl von Kommunikationsnachbarn die Frequenz der Beacons beeinflusst. Aktuelle Forschungsziele fokussieren auf dem integrierten Protokollentwurf für den gleichzeitigen Betrieb von C2X-Anwendungen mit potenziell gegensätzlichen Kanalzugriffszielen (z. B. hohe Datenrate vs. geringe Latenz).

Verkehrssicherheitsanwendungen

Ein zweites Arbeitsumfeld betrifft die Formen von Fahrzeugkommunikation, die der Verkehrssicherheit dienen. Thematisch sind Verkehrssicherheitsanwendungen aus Sicht der Netzwerkprotokolle spannend, da diese besonders harte Anforderungen insbesondere in Bezug auf Latenz und Zuverlässigkeit der Datenübertragung an die C2X-Protokolle stellen. Die Arbeitsgruppe forscht seit einigen Jahren an zwei Beispielanwendungen: Kreuzungsassistenten in der Stadt und kooperatives Kolonnenfahren (Platooning) auf Autobahnen und Landstraßen. Konkret wird für die Kreuzungsassistenten eine Kommunikation zwischen zwei Fahrzeugen, die auf eine Kreuzung zufahren aufgebaut, um die Wahrscheinlichkeit eines Unfalls basierend auf den gemessenen und prognostizierten Trajektorien der Fahrzeuge in Zeit und Raum zu bestimmen. Beim Platooning geht es um die Möglichkeit, Fahrzeuge mit minimalem Sicherheitsabstand (wenige Meter, deutliche Reduktion des Kraftstoffverbrauchs durch Windschatten) teilautomatisch zu steuern. Eine Regelung kontrolliert den Abstand nicht nur basierend auf Abstandsinformationen zum Vorderfahrzeug, sondern auch mit durch C2X-übertragenen Informationen über das Führungsfahrzeug und den Vordermann (z. B. Geschwindigkeit, Beschleunigung) [4]. Um Auffahrunfälle zu vermeiden, gilt es in beiden Bereichen insbesondere die Zuverlässigkeit zu erhöhen. Dies ist durch geeignete Kombination von Protokolltechniken (z. B. koordinierter Zeitmultiplex, Kontrolle der Übertragungssignalstärke für örtliche Trennung von Kommunikationsvorgängen oder situationsabhängige Adaption der Beaconfrequenz) möglich. Neuartige Verfahren zum gemischten Betrieb mit verschiedenen Kommunikationstechnologien sind ein Schwerpunkt der Forschung. So wird IEEE 802.11p z. B. mit LTE, Kommunikation über sichtbares Licht (Heckleuchten und Kamera) oder direkt über das Abstandsradarsignal erforscht.

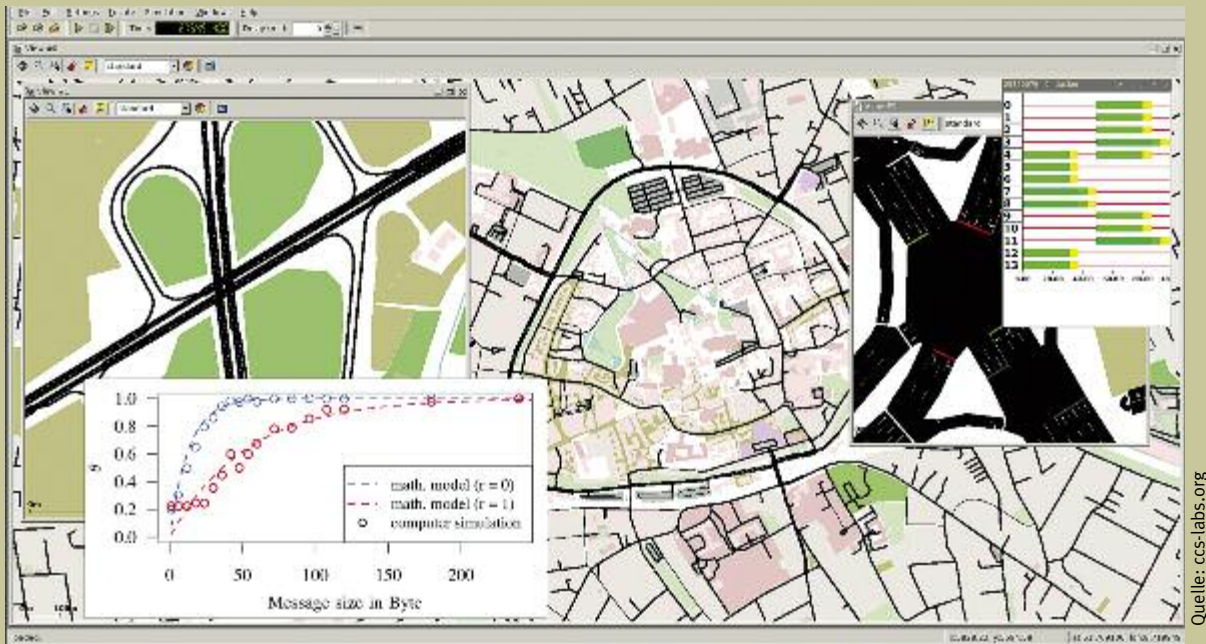


Abb. 3: Mit dem Simulationswerkzeug Veins ist es möglich, realistische Verkehrsflüsse zu erzeugen und Fahrzeugkommunikationsanwendungen in diesen Umgebungen zu erproben. Gezeigt ist ein Modell von Paderborn.

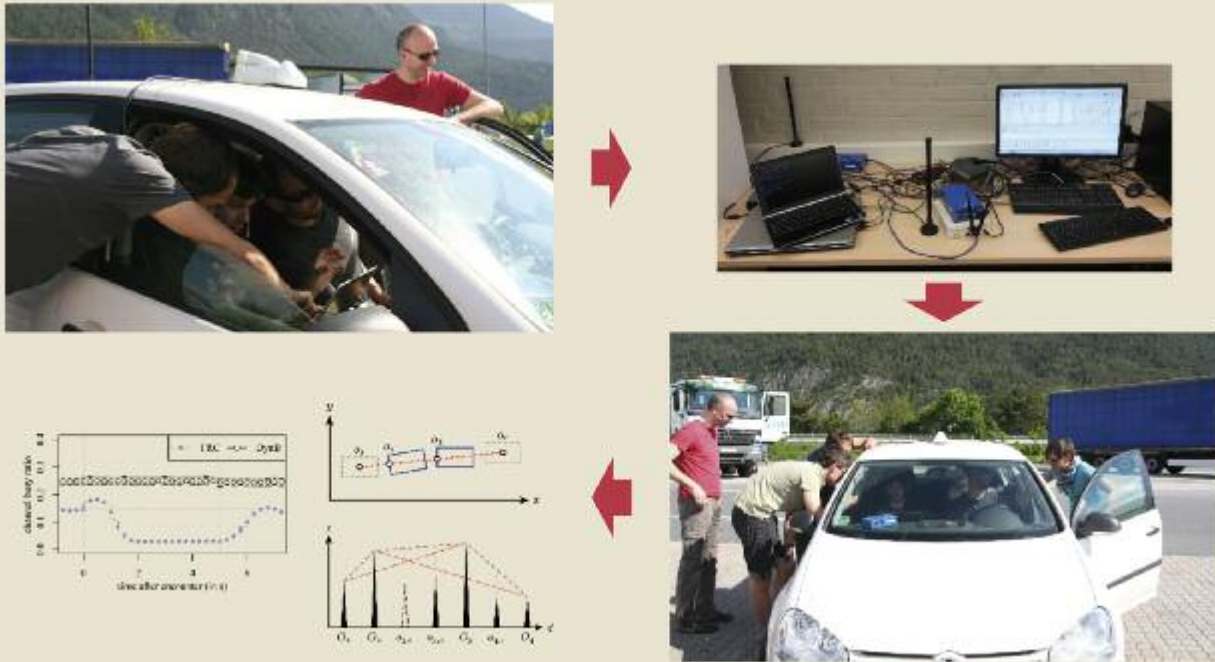
Simulation mit Veins

Ein drittes Forschungsthema ist die Bewertung von C2X-Protokollen mittels Simulation. Mit dem Simulator Veins (Vehicles in Network Simulation) [5] wurde von der Arbeitsgruppe ein Werkzeug entwickelt, mit dem die mikroskopisch genaue Simulation von Fahrzeugen auf einer realen Straßenkarte mit der Simulation von Fahrzeugkommunikationsprotokollen verknüpft wird. Konkret wird die Bewegung der Fahrzeuge im Straßenverkehr durch Modelle beschrieben, die die Längs- und Querschleunigung regeln, Überhol- und Kreuzungsmanöver formulieren und es sogar erlauben, Messdaten zu Kraftstoffverbrauch und CO₂-Ausstoß zu ermitteln. Auf Netzwerkseite wurden Modelle erstellt, die die Radioübertragung in C2X-Umgebungen realitätstreu widerspiegeln. Dazu gehören z. B. Modelle für die Signaldämpfung durch Gebäude oder andere Fahrzeuge, aber auch die Beschreibung der Protokollstapel aus Forschung und industrieller Standardisierung. Diese integrierte und holistische Simulation erlaubt es einerseits, die C2X-Kommunikation in realistischen Umgebungen zu studieren. Dabei geht es eher um statistische Eigenschaften der Protokolle. Andererseits werden auch gezielte Einblicke in sehr detaillierte Situationen möglich, z. B. bei einem Kreuzungsmanöver in dem ein Fahrzeug die Vorfahrtsregeln missachtet. Unser Veins-Simulator wird derzeit von Forschungsgruppen in mehr als 50 Ländern genutzt. Kern der aktuellen Forschung ist die Anbindung von Veins an weitere Simulatoren (z. B. an ein Hardware-in-the-Loop-Simulationssystem von dSPACE) sowie die kontinuierliche Verbesserung der genannten

Modelle. Dies erhöht entsprechend die Aussagekraft der Simulationen und unterstützt damit direkt die Forschung an C2X-Protokollen.

Experimentalplattform

Das vierte Forschungsumfeld hängt eng mit der simulativen Methode der Leistungsanalyse entwickelter Protokolle zusammen. Zwar kann mittels Simulation das erwartete Verhalten von C2X-Lösungen vorhergesagt werden, jedoch bedeutet Simulation letztendlich auch Abstraktion von physikalischen Effekten (statistische Modelle vs. konkrete Szenario-bedingte Signalausbreitung). Ziel der Arbeitsgruppe ist es, nach Möglichkeit alle Protokolle auch in realen Umgebungen zu validieren. Dazu wurde eine eigene Experimentalplattform entwickelt, die auf einem eingebetteten Linux-System basiert und eine nahezu vollständige Implementierung des IEEE 802.11p-Protokollstapels beinhaltet. Damit werden alle Protokollerweiterungen in Bezug auf Medienzugriff oder Informationsausbreitung im Netzwerk testbar. Lediglich der Zugriff auf die physikalische Schicht der Signalverarbeitung ist durch die systembedingt zu nutzende Netzwerkkarte verwehrt. Es kann zwar der Betriebssystemtreiber für die Karte modifiziert werden, jedoch nicht die Funktionalität des Funkchips. Dies konnte jedoch durch ein sogenanntes Software Defined Radio (SDR), welches die Funktionen der Netzwerkkarte komplett in Software abbildet, umgangen werden. Dazu wird nur noch die analoge Übertragung über den Drahtloskanal durch ein Hardwaremodul realisiert, jedoch die gesamte Signal in einem speziellen frei programmierbaren SDR-Modul. Unsere



Quelle: ccs-labs.org

Abb. 4: Viele Experimente sind nötig, um ausreichend empirische Daten zu sammeln, aus denen ein mathematisches Modell erzeugt werden kann. Letzteres wird in der Forschung z. B. für die Entwicklung neuer Protokolle genutzt.

mittlerweile preisgekrönte Realisierung des IEEE 802.11p-Protokolls in SDR [6] ist heute verbreitet im Einsatz und erlaubt es, komplett neue Protokollentwicklungen auf allen Schichten zu implementieren und zu testen. Wir sehen die SDR-Plattform als zentralen Baustein einerseits für weitere Forschungen an C2X-Protokollen, andererseits aber auch als Option für die Realisierung von Systemen, die direkt in Fahrzeuge eingebaut werden können. Durch die Softwarelösung würden diese auch für zukünftige Protokollstandards einfach durch ein Update fit für die nächste Generation gemacht werden können.

Lokale und internationale Vernetzung

Damit sind vier höchst aktuelle Forschungsfelder benannt, die vom Lehrstuhl für Verteilte Eingebettete Systeme an der Universität Paderborn derzeit im Bereich der Fahrzeugkommunikation verfolgt werden. Dabei profitieren diese Forschungen von der exzellenten lokalen und internationalen Vernetzung der Arbeitsgruppe. Gegründet wurde der Lehrstuhl 2014 als Stiftungsprofessur der Paderborner Firma dSPACE, mit der gemeinsam seitdem eine Reihe von neuen Forschungsthemen angegangen und teilweise bereits umgesetzt wurden. Auch die Stadt Paderborn ist zu einem festen Partner in der C2X-Forschung geworden. Der Standort Paderborn nimmt mittlerweile sogar eine Schlüsselfunktion in der Entwicklung der modernen Fahrzeugkommunikation ein. So fand im Dezember 2014 die internationale Tagung zum

Thema C2X, die IEEE Vehicular Networking Conference, zum ersten Mal in Deutschland und zwar in Paderborn statt. Auch dies war ein wichtiger Schritt, um Paderborn als eine feste Größe in der internationalen Grundlagenforschung zur modernen Fahrzeugkommunikation zu etablieren, wozu auch die hier vorgestellten Arbeitsfelder wesentlich beitragen.

Literatur

- [1] C. SOMMER UND F. DRESSLER, VEHICULAR NETWORKING, CAMBRIDGE, UK: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2014.
- [2] F. DRESSLER, H. HARTENSTEIN, O. ALTINTAS UND O. K. TONGUZ, „INTER-VEHICLE COMMUNICATION – QUO VADIS,“ IEEE COMMUNICATIONS MAGAZINE, Bd. 52, Nr. 6, pp. 170–177, JUNE 2014.
- [3] C. SOMMER, S. JOERER, M. SEGATA, O. K. TONGUZ, R. LO CIGNO UND F. DRESSLER, „HOW SHADOWING HURTS VEHICULAR COMMUNICATIONS AND HOW DYNAMIC BEACONING CAN HELP,“ IEEE TRANSACTIONS ON MOBILE COMPUTING, Bd. 14, Nr. 7, pp. 1411–1421, JULY 2015.
- [4] MICHELE SEGATA, BASTIAN BLOESSL, STEFAN JOERER, CHRISTOPH SOMMER, MARIO GERLA, RENATO LO CIGNO AND FALKO DRESSLER, „TOWARDS COMMUNICATION STRATEGIES FOR PLATOONING: SIMULATIVE AND EXPERIMENTAL

EVALUATION," IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 64 (12), PP. 5411–5423, DECEMBER 2015.

- [5] C. SOMMER, R. GERMAN UND F. DRESSLER, „BIDIRECTIONALLY COUPLED NETWORK AND ROAD TRAFFIC SIMULATION FOR IMPROVED IVC ANALYSIS," IEEE TRANSACTIONS ON MOBILE COMPUTING, Bd. 10, Nr. 1, pp. 3–15, JANUARY 2011.
- [6] B. BLOESSL, M. SEGATA, C. SOMMER UND F. DRESSLER, „TOWARDS AN OPEN SOURCE IEEE 802.11P STACK: A FULL SDR-BASED TRANSCEIVER IN GNURADIO," IN 5TH IEEE VEHICULAR NETWORKING CONFERENCE (VNC 2013), BOSTON, MA, 2013.



Dr.-Ing. Christoph Sommer ist AkadR a. Z. am Lehrstuhl für Verteilte Eingebettete Systeme. Nach seiner Promotion an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg 2011 verbrachte er als Gastwissenschaftler Aufenthalte an der Carnegie Mellon University (CMU) und der University of California, Los Angeles (UCLA). In seiner Forschung beschäftigt er sich mit Fragen rund um Simulation sowie Effizienz und Sicherheit von heterogenen Fahrzeugnetzen und deren Anwendung für autonomes Fahren.

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Falko Dressler

Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik

Verteilte Eingebettete Systeme

05251 60-6510

dressler@ccs-labs.org