

Potenziale kooperativer Lichtsignalsteuerung zur Steigerung der Verkehrseffizienz und -sicherheit

Claudia Santa, Jakob Kathes, Paul Mathias und Tobias Schendzielorz

Verfasseranschriften:
 M. Sc. Inf. C. Santa,
 claudia.santa@tum.de;
 Dipl.-Ing. J. Kathes,
 jakob.kathes@tum.de,
 Technische Universität
 München,
 Lehrstuhl für Verkehrstechnik,
 Arcisstraße 21,
 80333 München;
 Dr. rer. nat. P. Mathias,
 paul.mathias@mat-traffic.de,
 MATTRAFFIC,
 Buchkramerstraße 4,
 52062 Aachen;
 Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing.
 T. Schendzielorz,
 tobias.schendzielorz@
 heuboe.de,
 Heusch/Boesefeldt GmbH,
 Zenettstraße 34,
 80337 München

Kooperative Systeme erschließen Potenziale, die über diejenigen konventioneller intelligenter Verkehrssysteme hinausgehen. In städtischen Bereichen werden hierzu vor allem Systeme entwickelt und erforscht, die im Bereich signalisierter Knotenpunkte zum Einsatz kommen. Dabei kann die Beeinflussung aufseiten der Lichtsignalsteuerung, aufseiten der Fahrer oder in einer Kombination von beiden Elementen stattfinden. Im vorliegenden Fachbeitrag werden ausgewählte nationale und europäische Anstrengungen dieses Forschungsbereichs vorgestellt, die vorwiegend auf eine Steigerung der Verkehrseffizienz, aber auch der Verkehrssicherheit abzielen. Darauf aufbauend wird Forschungsbedarf identifiziert, der sich maßgeblich auf die Anforderungen zur Weiter- oder Neuentwicklung von Steuerungsverfahren, das sich verändernde Fahrverhalten durch den Einsatz kooperativer Systeme sowie die Berücksichtigung der sich weiter diversifizierenden Fahrzeugtypen und Antriebsarten konzentriert.

Cooperative systems exploit potential beyond conventional intelligent transportation systems. Development and research concerning such systems in urban areas mainly focus on signalized intersections. Cooperative systems can act to influence the signalization, the drivers, or a combination of both signalization and drivers. In this article, selected national and European research efforts are presented that aim at incurring both a raise of traffic efficiency and traffic safety. Subsequently, areas for future research are introduced, including requirements for the enhancement of existing or the development of new signal control systems, the change in driving behaviour due to the usage of cooperative systems and the consideration of further diversifying types of vehicles and propulsion systems.

1 Einleitung

Angetrieben von den technischen Entwicklungen im Bereich der drahtlosen Kommunikationstechnologien, haben sich kooperative Systeme zu einem Forschungsschwerpunkt in der Verkehrstechnik entwickelt. Der Informationsaustausch zwischen Fahrzeugen beziehungsweise zwischen Fahrzeugen und Infrastruktureinrichtungen bildet die Grundlage von kooperativen Systemen. Die Normungsorganisationen CEN und ETSI definieren kooperative Systeme als eine Untermenge der Intelligenten Verkehrssysteme (IVS), die mit einzelnen Einheiten des IVS kommunizieren und Informationen austauschen, um Hinweise zu geben oder bestimmte Handlungsweisen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit, Nachhaltigkeit, Verkehrseffizienz und Komfort auszulösen, die über den Handlungsspielraum alleinstehender Systeme hinausgehen (Schade 2010). Einhergehend mit der Steigerung der Verkehrseffizienz durch den Einsatz kooperativer Systeme sind auch

Hoffnungen auf eine Reduktion von Schadstoffausstoß und Treibhausgasemissionen im straßengebundenen Verkehr verbunden. Nach Angaben der Generaldirektion Energie und Verkehr der europäischen Kommission werden 40 % des Kohlendioxids sowie 70 % der vom Straßenverkehr verursachten Schadstoffe im innerstädtischen Bereich ausgestoßen (Directorate General for Energy and Transport 2007). Innerorts kann die Kapazität von Knotenpunkten, welche bei hoher Verkehrsnachfrage häufig lichtsignalisiert sind, als maßgeblich für die Effizienz des Verkehrsablaufs gesehen werden. Dies wird bestätigt durch eine Befragung deutscher Städte, welche im Rahmen der Forschungsinitiative UR:BAN durchgeführt wurde (Fakler, Geßenhardt et al. 2014). Diese ergab, dass zumeist die Kapazität einzelner Netzelemente als Ursache für eine geringe Qualität des Verkehrsablaufs gesehen wird. Darüber hinaus gaben, abhängig von der Einwohnerzahl der Stadt, 8 % bis 15 % der befragten Experten an, dass eine nicht optimale Steuerung der

Lichtsignalanlagen (LSA) als Ursache für Staus zu sehen ist.

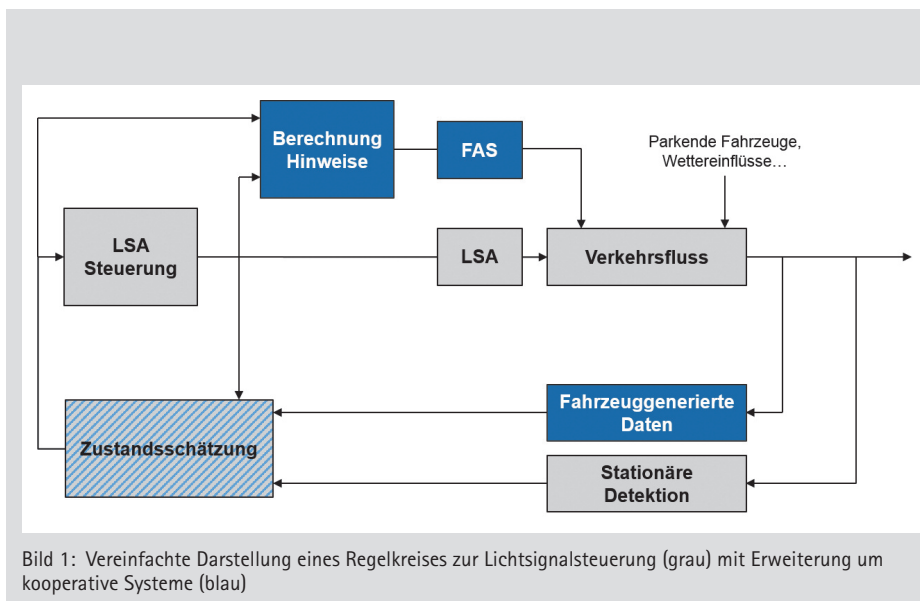
Für den Einsatz von kooperativen Systemen ergeben sich hier zwei hauptsächliche Ansatzpunkte zur Effizienzsteigerung. Zum einen ist durch ausgestattete Fahrzeuge eine verbesserte Informationslage gegenüber rein infrastrukturbasierter, konventioneller Detektion zu erzielen. Die gewonnenen Daten können dann für eine Optimierung der Lichtsignalsteuerung verwendet werden. Zum anderen wird es durch kooperative Systeme möglich, die Fahrer ausgestatteter Fahrzeuge zu informieren und dadurch deren Fahrverhalten zu beeinflussen. So können beispielsweise durch gezielte Geschwindigkeitshinweise die Anzahl der Halte reduziert und der Verkehrsfluss in der Zufahrt zur Lichtsignalanlage verstetigt werden.

Durch den Einsatz kooperativer Systeme eröffnen sich neben der Steigerung der Verkehrseffizienz auch bei der Verbesserung der Verkehrssicherheit neue Möglichkeiten. Ausgerüstete Fahrzeuge dienen als erweiterter Sensor im Straßenraum und

tragen somit zur Verbesserung der Informationslage z. B. für Wetter- oder Hinderniswarnungen bei. Durch den Austausch an Daten lassen sich aber auch im städtischen Umfeld Verkehrssituationen besser und frühzeitig erkennen, um so die beteiligten Verkehrsteilnehmer warnen zu können. Als ein Beispiel sei hier die Warnung vor einem Rotlichtverstoß genannt. Dass Kreuzungen verkehrssicherheitskritische Punkte im städtischen Umfeld sind, belegen die Zahlen des statistischen Bundesamtes (2014). Im Jahr 2013 wurden 199.650 Unfälle innerorts von der Polizei registriert. Etwa 42 % dieser Unfälle ereigneten sich während des Einbiegens oder Kreuzens an Knotenpunkten. 30 % der 977 innerorts Getöteten verloren ihr Leben durch diesen Unfalltyp. Nach Klanner (Klanner 2008) sind Unachtsamkeit (36 %), Sichtbehinderung (23 %) und falsche Beurteilung der Situation (33 %) die Hauptursachen für Unfälle an Kreuzungen und Einmündungen. In 42 % aller Fälle haben die Fahrer nicht gebremst und in 60 % keine Ausweichmanöver eingeleitet, um den Unfall noch zu verhindern oder dessen Folgen abzumildern. Weiterhin belegt das Statistische Bundesamt eine deutliche Altersabhängigkeit bei den Unfallursachen. Nicht angepasste Geschwindigkeit und Abstandsfehler wurden überdurchschnittlich häufig jüngeren Fahrern vorgeworfen, während Abbiegefehler oder Vorfahrtsmissachtung mit steigendem Alter deutlich zunahm. Diese Zahlen sind ein Indikator für den Bedarf an Unterstützung im städtischen Umfeld, um die komplexe Fahraufgabe besser zu bewerkstelligen. Vor allem auch im Hinblick auf eine immer älter werdende Gesellschaft. Im vorliegenden Fachbeitrag werden zunächst die Möglichkeiten, die sich im Hinblick auf eine Steigerung von Effizienz und Sicherheit durch den Einsatz kooperativer Lichtsignalsteuerung ergeben, in Form einer Potenzialanalyse beschrieben. Der darauffolgende Abschnitt behandelt den Stand von Technik und Forschung und soll einen Überblick über die bisherigen nationalen und europäischen Anstrengungen sowie die erzielten Ergebnisse geben. Darauf aufbauend wird der Forschungsbedarf im Bereich kooperativer Lichtsignalsteuerung abgeleitet.

2 Potenzialanalyse

Das Besondere und Neue der kooperativen LSA ist die Erweiterung des bekannten Re-



gelkreises der Steuerung (Bild 1). Bei konventionellen Systemen wird der Verkehrsfluss mithilfe stationärer Detektoren gemessen und anhand der so ermittelten Daten auf den Verkehrszustand zurückgeschlossen. Diese Schätzung des Zustands dient als Grundlage der LSA-Steuerung, welche dann über den Signalgeber der LSA den Verkehrsfluss beeinflusst. Daneben kommen äußere Störeinflüsse wie parkende Fahrzeuge oder Wettereinflüsse zum Tragen. Durch den Einsatz kooperativer Systeme werden die Verkehrszustände nicht mehr nur über stationäre Detektoren ermittelt, und die Information der Verkehrsteilnehmer geschieht nicht mehr nur über Lichtsignalanlagen. So können fahrzeuggenerierte Daten einer entsprechend erweiterten Zustandsschätzung zugeführt und ausgestattete Fahrzeuge mit verschiedenen Hinweisen zur Anpassung des Fahrverhaltens über geeignete Fahrerassistenzsysteme (FAS) beeinflusst werden. Das eröffnet eine Vielzahl neuer Möglichkeiten zur Verbesserung von Fahrkomfort, Verkehrssicherheit und Verkehrseffizienz. Fahrzeuggenerierte Daten im Bereich signalisierter Kreuzungen bilden prinzipiell eine sehr detaillierte Informationsbasis, die über das hinausgeht, was mit stationären lokalen Detektoren wie Induktionsschleifen alleine erreicht werden kann. Dabei hängt der Nutzwert der Informationen von der Ausstattungsrate der Fahrzeuge ab. Deutlich präzisere oder sogar

erstmalig verfügbare Verkehrszustandsgrößen sind beispielsweise: Verkehrsnachfragen (auch im Falle längerer Rückstaus), Abbiegeraten, Geschwindigkeiten, Rückstaulängen pro Fahrstreifen und variierende Sättigungsverkehrsstärken der einzelnen Verkehrsströme. Einerseits lassen sich so makroskopische lokale Verkehrszustände im Kreuzungsbereich genauer bestimmen, andererseits stehen nun auch zunehmend mikroskopische Größen wie die Fahrlinien einzelner Fahrzeuge zur Verfügung. Beides kann zur Effizienzsteigerung der (verkehrsabhängigen) LSA-Steuerungen genutzt werden. Die verbesserten lokalen Verkehrszustände etwa können existierenden Steuerungen direkt zugutekommen, indem „virtuelle Detektoren“ definiert werden, deren dynamische Werte aus den Verkehrszuständen algorithmisch abgeleitet werden. Die Fahrzeugtrajektorien auf der anderen Seite ermöglichen hochflexible und individuelle Anforderungsmechanismen verschiedener Prioritätsstufen für prinzipiell jedes Fahrzeug; vor allem aber für Sondereinsatz- und ÖPNV-Fahrzeuge. Diese Maßnahmen zur spezifischeren Priorisierung der Verkehrsteilnehmer werden unter dem Stichwort „Balanced Priority“ zusammengefasst. So kann die Priorisierung des öffentlichen Verkehrs etwa vom Belegungsgrad der Fahrzeuge oder von Abweichungen vom Fahrplan abhängig gemacht werden. Daneben können auch verschiedene An-

Besuchen Sie unsere Website
www.sicherheitsaudit.de
 Wir auditieren Ihre Verkehrsanlagen!



Bild 2: Beeinflussungsmöglichkeiten durch kooperative Lichtsignalsteuerungen

Bild 3: Geschwindigkeitsempfehlung und Anzeige der Position relativ zur Grünzeit in der „Wolfsburger Welle“ (Zimdahl 1983)



triebssysteme Einfluss auf die Signalsteuerung haben, da beispielsweise der Halt und das anschließende Anfahren eines Lkw mit Dieselmotor höhere Anfahrverluste und Emissionen zur Folge haben, als dies bei einem Elektrofahrzeug der Fall ist. Neben den Verkehrszuständen kommt aber auch den Steuerungszuständen der LSA eine besondere Bedeutung zu. Insbesondere die Restdauer von Freigabe- oder Sperrzeiten, also die Prognosen von Signalisierungszuständen, spielen eine zentrale Rolle. Dies hat damit zu tun, dass zukünftige Applikationen und Dienste etwa die Fahrer im Kreuzungsbereich leiten oder ihnen Geschwindigkeitsempfehlungen übermitteln wollen. Auch teilautomatische Reaktionen der Fahrzeuge könnten direkt von solchen Prognosen abhängen. Die große Herausforderung bei der Prognose von Signalisierungszuständen besteht darin, dass immer mehr Lichtsignalanlagen ständig oder zumindest zu großen Zeitanteilen verkehrsabhängig schalten. In Deutschlands Großstädten mit 100.000 bis einer Million Einwohnern schalten derzeit 70 bis 80 % der LSA verkehrsabhängig (Fakler, Geßenhardt et al. 2014). Das heißt, ihre Schaltzeiten hängen von den aktuell gemessenen Verkehrszuständen, zufälligen Anforderungen von Fußgängern und

ÖPNV-Fahrzeugen und ggf. auch eingreifenden übergeordneten Vorgaben eines Verkehrsrechners oder einer Verkehrsleitzentrale ab. Verschiedene Ansätze zur Prognose von Schaltzeitpunkten werden im nächsten Kapitel kurz erläutert. Aufbauend auf der Kenntnis dieser künftigen Schaltzeitpunkte lassen sich durch den Einsatz kooperativer Systeme sowohl Längsführung als auch Querverführung von Fahrzeugen beeinflussen, sodass der Durchsatz an der LSA und die Sicherheit erhöht werden können. Die Beeinflussung kann Angaben zu empfohlenem Geschwindigkeitskorridor und Gangwahl sowie Starthinweise, die neben den zukünftigen Signalzeiten aus einer Abschätzung des Rückstaus sowie Position und Richtungsinformation im Fahrzeug abgeleitet werden, umfassen. Geschwindigkeitsempfehlungen sind nicht nur von individuellem Nutzen für den einzelnen Fahrer, sondern auch von kollektivem Nutzen für den gesamten Verkehrsablauf im Zufluss auf die LSA, denn sie ermöglichen es, Pulks zu bilden und zusammenzuhalten, wodurch eine Effizienzsteigerung durch Verkürzung der Zeitlücken erreicht werden kann. Neben der Längsführung kann die Querverführung optimiert werden, indem fahrstreifenfeine Verhaltensempfehlungen bei

mehrstreifigen LSA-Zufahrten gegeben werden. Dazu sind fahrstreifengenaue Informationen über die Länge des aktuellen Rückstaus, die Zeitbedarfswerte zum Abbau des Rückstaus und die Progressionsgeschwindigkeit erforderlich. Anhand dieser Daten kann ein präferierter Fahrstreifen bestimmt und empfohlen werden.

Fahrstreifengenaue Positionierung ist auch bei Systemen, die den Fahrer bei der Unfallvermeidung unterstützen, unerlässlich. Bei Kombination von Informationen über die Steuerung der LSA und der Position ist es möglich, einen Rotlichtverstoß entsprechend dem Fahrmanöver zu erkennen. Bedingt verträgliche Abbiegemanöver, wie z. B. das Rechtsabbiegen mit kreuzenden Radfahrern, können durch die Zusammenführungen von Bewegungsdaten der Radfahrer und des abbiegenden Fahrzeugs erfolgen.

Über die Fahrerempfehlungen bzw. Warnhinweise hinaus kann sowohl die Längs- als auch die Querverführung vollautomatisch erfolgen. Für den dazu erforderlichen aktiven Eingriff in die Fahrzeugführung sind hinreichend genaue Umfelddaten unerlässlich. Dies umfasst die Erfassung von Fahrzeugen auf dem eigenen Fahrstreifen (flussaufwärts und -abwärts) sowie auf den Nachbarfahrstreifen. Ermöglicht wird dies durch fahrzeugeigene Sensorik. Weiterhin sind Eingriffe in die Motor- oder Getriebesteuerung auf Basis von Haltezeitpunkten und -dauern denkbar, die, wie auch eine Empfehlung zur Gangwahl, den Antriebsstrang der Fahrzeuge betreffen. Zusammenfassend lässt sich das Potenzial kooperativer Lichtsignalsteuerung damit in zwei Hauptkategorien einordnen. Zum einen die Möglichkeit der Beeinflussung der Fahrer und zum anderen die Nutzung einer erweiterten Informationsbasis zur Einflussnahme auf die Signalsteuerung. Dies kann auch, wie in Bild 2 dargestellt, Hand in Hand gehen: Die Fahrer werden über die Signalzustände informiert und erhalten Geschwindigkeitsempfehlungen. Gleichzeitig wird bei Optimierung der Signalsteuerung berücksichtigt, dass die Fahrer informiert sind.

3 Stand von Technik und Forschung

Als Meilenstein zur Fahrerbeeinflussung im Rahmen einer kooperativen Lichtsignalsteuerung kann das vielzitierte Forschungsprojekt „Wolfsburger Welle“ aus dem Jahr 1983 gesehen werden (Zim-

dahl 1983). Durch Nutzung von Infrarot-technik konnten erstmals Lichtsignalzeitpunkte gesendet werden und eine fahrzeugseitige Geschwindigkeitsempfehlung, wie in Bild 3 dargestellt, gegeben werden. Im Rahmen dieses Vorhabens wurden bereits erste Erkenntnisse zur Wirkung von Geschwindigkeitsempfehlungen zur Reduktion der Anzahl der Halte und des Kraftstoffverbrauchs, aber auch zum Verhalten der Fahrer, gewonnen. Als hauptsächliches Hindernis für eine weitere Erprobung des Systems war die kostenaufwendige Kommunikationstechnologie anzusehen. Inzwischen stehen aber leistungsfähigere und kostengünstigere Alternativen zur drahtlosen Kommunikation zur Verfügung.

Prinzipiell kann man dabei zwischen der weiträumigen Datenübertragung mittels moderner Mobilfunkstandards wie UMTS oder LTE und der kleinräumigen Datenübertragung basierend auf WLAN-Technologie (ITS-G5) unterscheiden. Neben diesen technischen Lösungsmöglichkeiten zur Datenübertragung sind aber auch entsprechende Protokolle und Datenformate zu definieren. Diese Aufgabe teilen sich für ITS-G5 das European Telecommunications Standards Institute (ETSI) und das Comité Européen de Normalisation (CEN), das sehr eng mit der International Organization for Standardization (ISO) verzahnt ist. Die beiden prinzipiellen Lösungswege zur Datenübertragung sind in Form einer stark abstrahierten Darstellung der Systemarchitektur in Bild 4 gezeigt, wobei auf die Datenübertragung der Infrastruktureinrichtungen bewusst nicht eingegangen wird.

Die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation liegt im Bereich der ETSI und die Fahrzeug-zu-Infrastruktur- und Infrastruktur-zu-Infrastruktur-Kommunikation im Bereich von CEN und somit auch der ISO. Vor dem Hintergrund dieser Standardisierungen wurde in der Vergangenheit eine Vielzahl von Konsortien gegründet, die diese Technologien in verschiedenen Städten zur Kommunikation zwischen Lichtsignalanlage und Fahrzeug erprobt haben. Eine Auswahl dieser Anstrengungen soll im Folgenden vorgestellt werden. Die Verkehrssicherheit an Kreuzungen wurde schon im bundesweiten Projekt INVENT (2001 bis 2005) thematisiert, hier aber in erster Linie mittels fahrzeugautarker Systeme und nicht beschränkt auf Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage. Bei fahrzeugautarken Systemen erfasst das Fahrzeug durch die eigene Sensorik das

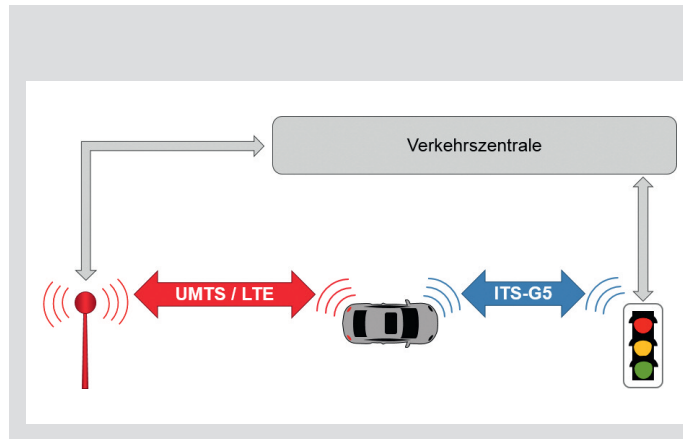


Bild 4: Mögliche Kommunikationswege mittels weiträumiger (rot) oder kleinräumiger (blau) Datenübertragung

nähere Umfeld und kann bei einer Gefährdung den Fahrer warnen oder sogar eine Gefahrenbremsung einleiten. Durch die Verbesserung der Kommunikationstechnologie wurden im Nachfolgeprojekt Aktiv (2006 bis 2010) nicht nur die effizienzsteigernden Möglichkeiten der kooperativen Systeme an LSA untersucht, sondern auch der Sicherheitsgewinn an Kreuzungen weiter erforscht. Die Kamera, die in INVENT noch den Signalisierungszustand der LSA beim Heranfahren eines Fahrzeuges erkannt hat, wurde durch die Übertragung des Schaltzustands in einem noch proprietären Datenformat ersetzt. Neben der Weiterentwicklung der fahrzeugautarken Systeme, vor allem zum Schutz schwächerer Verkehrsteilnehmer an Kreuzungen, wurden mittels Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation Assistenzsysteme zum Queren und bedingt verträglichen Abbiegen an Kreuzungen entwickelt.

Diese Vorgehensweise spiegelt sich auch in dem europäischen Projekt PREVENT (2004 bis 2007) wieder. Im Teilprojekt INTERSAFE wurden die Informationen, die das Fahrzeug von seinem Umfeld durch den Einsatz von Laserscannern ermitteln mit der Information über den Signalisierungszustand der LSA fusioniert und durch WLAN-Technologie übertragen. Dadurch wurden verschiedene Funktionen, wie z. B. die Warnung des Fahrers vor einem unbeabsichtigten Anfahren bei Rot, ermöglicht. Auf europäischer Ebene erforschten die beiden Schwesterprojekte CVIS (2006 bis 2010) und SAFESPOT (2006 bis 2010) als Nachfolge von PREVENT den Einsatz von modernen Kommunikationstechnologien an signalisierten Knotenpunkten. Das Ziel von CVIS war es, die Übertragung von Daten mittels ITS-G5 eingebettet im Communication Access for Land Mobile (CALM) weiterzuentwickeln und Anwendungen zur Erhöhung der Verkehrseffizienz unter anderem auch in der Stadt voranzutreiben. Auch wurden erste Versuche mit „Balanced Priority“ und „Mikrorouting“ im

Umfeld des Knotenpunkts unternommen. SAFESPOT verfolgte das Ziel, die Verkehrssicherheit mittels des kleinräumigen Austauschs von Daten über Fahrzeug-zu-Fahrzeug- und Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation zu erhöhen. Der Wahrnehmungshorizont des Autofahrers sollte auf diese Weise in Raum und Zeit vergrößert werden. Die SAFESPOT-Anwendung IRIS (Schendzielorz, Mathias et al. 2014) berechnet die Trajektorien von Fahrzeugen und Radfahrern an einem städtischen Knotenpunkt und ist somit in der Lage, vor Kollisionen zu warnen. Mittels Laserscannern am Straßenrand werden die schwächeren Verkehrsteilnehmer erkannt. Die Fahrzeuge übertragen neben Positions- und Geschwindigkeitsdaten auch den Zustand des Fahrtrichtungsanzeigers an die kooperative LSA. Hier werden die Informationen überlagert und vorausberechnet, sodass potenziell gefährliche Situationen rechtzeitig erkannt werden und der betroffene Fahrer gewarnt werden kann. Mittels dieses Lösungsansatzes wurden die Fahrer bei den Szenarien Rotlichtverstoß und bedingt verträgliches Abbiegen nach links wie auch nach rechts bei Beachtung von Fußgängern und Radfahrern unterstützt.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgte auch das europäische Projekt INTERSAFE-2 (2008 bis 2011) (Rössler 2010). Auch hier wurde der Knotenpunkt mit zusätzlicher Sensorik ausgestattet. Zum einen mit Laserscannern zur Erkennung von Fahrzeugen, Radfahrern und Fußgängern, zum anderen mit Kameras, die die Oberflächenbeschaffenheit der Straße aufnahmen. Im Gegensatz zum IRIS-Ansatz von SAFESPOT wurden die Informationen nicht an einer kooperativen Einheit am Steuergerät zusammengetragen, sondern per WLAN-Kommunikation an das entsprechende Fahrzeug versendet. D. h. es wurden Daten über den Signalisierungszustand der LSA, aber auch über sich herannähernde Fahrzeuge und eventuell glatte Fahrbahnoberflächen

übertragen. Diese Informationen wurden im Fahrzeug entsprechend weiterverarbeitet und mit Daten aus der bordeigenen Sensorik fusioniert. Eine prototypische Anzeige ermöglichte die Bereitstellung einer Warnung, falls erforderlich. Die Fusionierung von bordeigenen Daten und Informationen, welche von der kooperativen LSA bereitgestellt werden, wurde auch in dem Projekt KO-FAS (2009 bis 2013) weiterverfolgt (Weidl, Breuel 2012). Hier kamen unter anderem Bayes'sche Netze zum Einsatz, um die Eintreffenswahrscheinlichkeiten bestimmter gefährlicher Ereignisse abzuschätzen und den Fahrer zu warnen.

Audi setzte mit der Restrotanzeige und der sogenannten „Dynamischen Grünen Welle“ zwei Anwendungsfälle in Ingolstadt im Rahmen des Forschungsprojekts TRAVOLUTION (2006 bis 2008) um. „Die Restrotanzeige gibt dem Fahrer die verbleibende Wartezeit bei Rot an. Bei der Dynamischen Grünen Welle wird dem Fahrer vor Erreichen der Kreuzung ein Geschwindigkeitsbereich angezeigt, innerhalb dessen er – unerwartete Störungen ausgeschlossen – ohne Halt die Kreuzung passieren kann“ (Braun, Busch et al. 2009). Als Vorserienentwicklung wurden die beiden Systeme auf die Städte Verona, Berlin und Garmisch-Partenkirchen ausgedehnt (Zweck, Schuch 2013). Dort wurden insgesamt hunderte von Knotenpunkten mit zum Teil verkehrsabhängiger wie auch festzeitgesteuerter LSA-Steuerung ausgestattet. In einem zweiten Teilprojekt von TRAVOLUTION wurde ein evolutionärer Algorithmus zur Optimierung der netzweiten Lichtsignalsteuerung in Ingolstadt entwickelt, der in die adaptive Netzsteuerung BALANCE integriert wurde und dort als Alternative zum bisher vorhandenen Hill-Climbing-Algorithmus als Optimierungsmethode zur Verfügung steht. Dieses Teilprojekt ist jedoch losgelöst von der Entwicklung kooperativer Systeme.

Im Rahmen des Forschungsprojekts Aktiv (2006 bis 2010), welches vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie sowie vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert wurde, wurde sowohl eine Beeinflussung der Fahrer als auch der Signalsteuerung erprobt (Aktiv-Konsortium 2011). Dabei wurden mobile Endgeräte genutzt, um fahrzeuggenerierte Daten zu versenden und eine Anzeige von Restrot- und Restgrünzeiten sowie von Geschwindigkeitsempfehlungen zu ermöglichen. Die fahrzeuggenerierten Daten dienen einer Optimierung der Licht-

signalsteuerung auf lokaler Ebene sowie einer Rückstauschätzung, welche auf Basis der Position des ausgestatteten Fahrzeugs und eines deterministischen Ankunftsprozesses eine Schätzung für die aktuelle Rückstaulänge liefert. Eine Reduktion der Anzahl der Haltevorgänge sowie der Wartezeiten wurde sowohl durch Testfahrten als auch durch Mikrosimulationen nachgewiesen.

Ebenfalls gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie schließt sich das Projekt KOLINE (2009 bis 2012) an. Innerhalb des Aufbaus dieses Projekts finden die fahrzeuggenerierten Daten Eingang in eine netzweite Optimierung der Signalprogramme (Bley, Kutzner et al. 2011). Wie schon im Projekt Aktiv werden Informationen über eine geschätzte Rückstaulänge und Schaltzeitpunkte in Form von Geschwindigkeitshinweisen oder Restrotanzeigen an die Fahrer ausgestatteter Fahrzeuge übermittelt. Die Untersuchungen im realen Testfeld beschränken sich auf einen Straßenzug von drei benachbarten Knotenpunkten in Braunschweig. Bei der Entwicklung der Anwendungen im Rahmen von KOLINE wurde auf Kompatibilität mit dem Forschungsprojekt sim^{TD} geachtet, in dem ein größerer Feldtest stattfand.

Im Gegensatz zu den bisher genannten Projekten, die Prototypen in kleinen Testgebieten getestet und demonstriert haben, wurden im Rahmen des von drei Bundesministerien geförderten Forschungsprojekts sim^{TD} (2008 bis 2013) Anwendungen für die Szenarios Autobahn, Landstraße und Stadtstraße großräumig und über einen längeren Zeitraum untersucht. Für den städtischen Bereich wurden in Frankfurt dazu 23 Knotenpunkte mit Kommunikationstechnik ausgestattet (siehe sim^{TD}-Konsortium 2010). Dort wurden ebenfalls die Restrotanzeige und die fahrzeugseitige Geschwindigkeitsempfehlung erprobt. Außerdem werden die Daten der kooperativen Fahrzeuge zur Verbesserung der Signalsteuerung eingesetzt. Dies erfolgt auf lokaler Ebene durch eine Einbindung der Daten in die Steuerung VS-PLUS. Darüber hinaus finden die fahrzeuggenerierten Daten Verwendung auf der Netzebene, da sie neben den konventionell gewonnenen Daten zu Ermittlung von Rahmensignalplänen dienen.

Im europäischen Projekt eCoMove (2010 bis 2014) wurde der Schwerpunkt speziell auf die Reduktion von Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen gelegt. Zu dessen Erreichung wurden verschiedene Applika-

tionen entwickelt und untersucht. Im Bereich der kooperativen Lichtsignalsteuerung sind hier insbesondere „ecoGreen Wave“, „ecoBalanced Priority“ sowie „eco-Approach Advice“ zu nennen. Die Applikation ecoGreen Wave ist dadurch charakterisiert, dass (1) die Koordinierungsgeschwindigkeit dynamisch innerhalb gewisser Grenzen veränderbar ist (abhängig von der aktuellen Verkehrssituation) und (2) die raum-zeitliche Struktur der Fahrzeugpulks unter Verwendung von Fahrempfehlungen für die Fahrer beeinflusst werden. Dies ermöglicht eine optimale Geschwindigkeitsanpassung der Fahrzeuge, um auf dem betreffenden Streckenabschnitt im Grünband zu fahren. Demgegenüber wirkt ecoBalanced Priority auf Knotenpunktebene, indem alle ankommenden Fahrzeuge entsprechend ihres Ziels unterschiedlich gewichtet werden und Lkw durch ihre hohen CO₂-Emissionen gesondert priorisiert werden. Der eco-Approach Advice dient der Anpassung der Progressionsgeschwindigkeit zwischen den Knotenpunkten. Er unterscheidet sich von bereits existierenden Ansätzen, indem er zusätzlich einen optimalen Fahrstreifen empfiehlt und Fahrzeugpulks bildet und zusammenhält. Die Simulationsstudien in Helmond, Niederlande zeigen bei 100 % Ausstattungsrates folgende Ergebnisse (Baseline ist eine Planung mittels des teilweise adaptiven Verfahrens CCOL): 2,8 % CO₂-Ersparnis für den ecoApproach Advice, 0,1 % mehr CO₂ Ausstoß für die ecoGreen Wave und 5,9 % CO₂-Ersparnis für die ecoBalanced Priority. In Kombination erreichen ecoApproach Advice mit ecoGreen Wave 2,9 % CO₂-Ersparnis und ecoApproach Advice mit ecoBalanced Priority 1,1 % CO₂-Ersparnis, (Lübmann, Vreeswijk et al. 2014).

Das Projekt UR:BAN (2012 bis 2016) wiederum wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert und dauert im Gegensatz zu den vorgenannten Forschungsvorhaben zur Zeit des Verfassens dieses Beitrags noch an. Die Applikationen, die im Bereich der kooperativen Lichtsignalsteuerung entwickelt werden, umfassen dabei verschiedene zentralen wie auch knotenpunkt-basierte Anwendungen (Ortgiese, Breitenberger et al. 2011). Zentralenseitig werden beispielsweise Algorithmen zur Prognose von Schaltzeiten der Lichtsignalanlagen sowie zur Prognose von Haltepunkt und -dauer entwickelt. Des Weiteren soll neben den bekannten Geschwindigkeitshinweisen zur Vermeidung von Halten auch dann eine

Fahrempfehlung ausgegeben werden, wenn ein Halt an der Lichtsignalanlage unvermeidlich ist. Ziel ist es, eine Reduktion von Emissionen und Kraftstoffverbrauch durch optimale Verzögerung zu erreichen. Als weitere zentralenseitige Applikation wird speziell für Lkw ein Pulkmanagement entwickelt, das durch Eingriffe in die Signalsteuerung eine Reduktion der Anzahl der Halte von Lkw und damit auch deren Emissionen erreichen soll. Auch auf Knotenpunktebene werden im Forschungsprojekt UR:BAN unterschiedliche Funktionen im Bereich kooperativer Lichtsignalsteuerung erprobt. Hierzu zählt beispielsweise eine modellbasierte Optimierung zur Priorisierung des öffentlichen Verkehrs, die den negativen Einfluss auf andere Verkehrsströme zu minimieren versucht.

Das europäische Projekt Compass4D (2013 bis 2016) ist zum Zeitpunkt des Verfassens dieses Artikels ebenfalls noch nicht abgeschlossen. Innerhalb des Projekts werden in sieben europäischen Städten sowohl sicherheitsrelevante als auch effizienzsteigernde Applikationen im Bereich der kooperativen Lichtsignalsteuerung längerfristig getestet, um Erfahrungen zum Einsatz und Betrieb der Systeme liefern zu können (Alcaraz, Tsegay et al. 2013). Zur Steigerung der Effizienz werden im Rahmen von Compass4D Geschwindigkeitshinweise, Informationen zur Restrotzeit sowie Priorisierungsmechanismen für den öffentlichen Verkehr, den Güterverkehr sowie für Einsatzfahrzeuge untersucht. Die sicherheitsrelevanten Applikationen umfassen Warnungen im Falle von möglichen Rotlichtverstößen sowie Warnungen in Bezug auf bedingt verträgliche Verkehrsströme.

Dank der Fortschritte in der Kommunikationstechnologie und der Arbeit in den Normungsorganisationen haben sich die technologischen Randbedingungen aus den 80er-Jahren, als die Kommunikation zwischen Lichtsignalanlagen und Fahrzeugen im Rahmen der Wolfsburger Welle zum ersten Mal erprobt wurde, wesentlich verbessert. Eine Vielzahl an Konsortien hat seitdem in unterschiedlichen nationalen und internationalen Forschungsprojekten kooperative Systeme entwickelt und getestet. Häufiger Bestandteil der Forschungsaktivitäten war die Entwicklung von Assistenzsystemen, welche Fahrern beim Annähern einer LSA Fahrempfehlungen oder Warnungen ausgeben, um die Verkehrseffizienz und -sicherheit zu steigern und den Kraftstoffverbrauch zu redu-

zieren. Des Weiteren beinhalten viele Aktivitäten eine Optimierung der LSA-Steuerung unter Verwendung fahrzeuggenerierter Daten.

4 Forschungsbedarf

Die verschiedenen derzeit entwickelten kooperativen Anwendungen erfordern den Austausch unterschiedlicher Echtzeitinformation zwischen den Fahrzeugen und mit der Verkehrsinfrastruktur. Eine Reihe von bereits kurz vor der Markteinführung stehenden Anwendungen im Bereich LSA-Fahrzeug-Kooperation benötigt zum Beispiel exakte Vorhersagen der innerhalb der nächsten Sekunden zu erwartenden Schaltungen der Lichtsignalanlagen. Um eine fehlerhafte Information der Fahrer zu vermeiden, sollte nach Wunsch der Fahrzeughersteller die Eintreffenswahrscheinlichkeit nahezu 100 % betragen. Die größte Herausforderung solcher Systeme besteht aber, wie bereits erläutert, darin, dass immer mehr Lichtsignalanlagen ständig oder zumindest zu großen Zeitanteilen verkehrabhängig schalten. Vor dem Hintergrund steigender Verfügbarkeit von Daten wird diese Entwicklung zu mehr Adaptivität prinzipiell ebenfalls steigen. Damit wird eine exakte, sekundengenaue Prognose der Schaltzeiten schwierig, wenn nicht sogar unmöglich. Diese aber ist für einige kooperative Anwendungen absolut unverzichtbar, für andere muss zumindest eine klare Information zur Eintreffenswahrscheinlichkeit beziehungsweise dem Wertebereich der Prognose geliefert werden. Dadurch kann ein Zielkonflikt zwischen der Beeinflussung der Fahrer und der Signalisierung identifiziert werden, welcher einen Ansatzpunkt für Forschungsaktivitäten darstellt.

Zur Prognose von LSA-Schaltzeiten können grundsätzlich zwei Lösungsstrategien unterschieden werden: (1) Bei den statistischen Ansätzen wird versucht, aus den zurückliegenden Schaltungen der letzten Minuten bzw. aus historischen Schaltungen eine Prognose abzuleiten (z. B. Menig, Hildebrandt et al. 2008, Krumnow 2012, Stevanovic, Stevanovic et al. 2013, Weisheit 2014). Dazu wird nicht in die Steuerungsabläufe eingegriffen. (2) Ein anderer Ansatz zielt darauf ab, die verschiedenen Typen der LSA-Steuerungen (regel- bzw. modellbasiert) so in ihrer Arbeitsweise zu verändern, dass zumindest ein Intervall von einigen Sekunden vor Umschalten geschützt ist, also die Prognose in diesem

Zeitraum 100%ige Sicherheit aufweist. Dies würde die Steuerungen einerseits starrer und unflexibler machen. Andererseits könnten die umfassend informierten Verkehrsteilnehmer die starrereren Grünfenster effizienter nutzen, da die Pulks enger zusammengehalten und passgenauer durch diese Grünfenster geleitet werden. Diese Lösungsstrategie bietet viel Potenzial, wird jedoch bisher kaum verfolgt. Insgesamt scheint es bisher noch keine wirklich zufriedenstellenden Lösungen für alle Bereiche und Anwendungsfälle der verkehrabhängigen Steuerungen zu geben. Das Thema bleibt daher Forschungsgegenstand.

Die auf dem Markt verfügbaren Steuerungssysteme für Lichtsignalanlagen wurden zumeist zu einer Zeit entwickelt, zu der der großflächige Einsatz kooperativer Systeme nicht absehbar war. Daher stellte die Vorhersagbarkeit der Schaltzustände keine Entwicklungsanforderung dar, woraus sich verschiedene Forschungsfragen ergeben. So ist es von Interesse, inwiefern Systeme mit unterschiedlichen Steuerungsphilosophien ausreichend genau vorhersagbar sind, beziehungsweise welche Anpassungen für eine solche Vorhersagbarkeit, zumindest einige Sekunden vor dem Umschalten, getroffen werden müssten. Zwar wurden in der Vergangenheit bereits unterschiedliche, wie etwa die oben erwähnten, Verfahren zur Vorhersage von Schaltzuständen vorgestellt, doch wäre es interessant, einen stärkeren Einbezug der Systemkenntnis der jeweiligen Steuerungsverfahren vorzunehmen. So unterscheiden sich beispielsweise die Systeme Motion (Busch, Kruse 1993) und Balance (Friedrich 1999) mit zentral berechneten Rahmensignalplänen und lokaler Anpassung der Steuerung von Systemen wie Utopia, bei denen ein Vorhersagemechanismus durch den rollenden Zeithorizont systemimmanent ist. Auch beim Steuerungssystem Scoot (Hunt, Robertson et al. 1981) sind durch die inkrementellen Änderungen der Steuerung besondere Charakteristika in Bezug auf die Vorhersagbarkeit zu vermuten. Neben der Untersuchung bestehender Steuerungsverfahren stellt sich die Frage nach Notwendigkeit und Wirkung neuer Verfahren, die die Anforderungen kooperativer Systeme bereits zum Zeitpunkt der Entwicklung berücksichtigen. Wie zuvor bei der Identifikation des Zielkonflikts zwischen Beeinflussung von Fahrern und Signalsteuerung bereits erwähnt, zählen dazu eine Nutzungsmöglichkeit der fahrzeuggenerierten Daten so-



Bild 5: Forschungsbedarf bei kooperativen Lichtsignalsteuerungen

wie eine genaue Prognosemöglichkeit der zukünftigen Schaltzustände. Zudem stellt sich die Frage, inwiefern die Beeinflussung der Fahrzeuge innerhalb von Modellierung und Steuerung zu berücksichtigen ist, um das angepasste Fahrverhalten vollständig in der Rückkopplungsschleife zu berücksichtigen.

Weiter haben Untersuchungen in Testfeldern verschiedener Forschungsprojekte (z. B. eCoMove, sim^{TD}) gezeigt, dass die Restdauern von Rot und Grün alleine nicht ausreichen, um sinnvolle Verhaltensempfehlungen für die Fahrer im Kreuzungsbereich zu generieren. Hinzukommen müssen Abschätzungen der aktuellen Rückstaulängen vor den Haltelinien sowie weiterer verkehrstechnischer Kennwerte zur Verkehrsflussoptimierung bzw.

-ermittlung. Erst in Kombination mit diesen Informationen können die einzelnen Trajektorien der sich nähernden Fahrzeuge prognostiziert und verlässliche Geschwindigkeitsempfehlungen im Fahrerassistenzsystem erzeugt werden.

Darüber hinaus wird die Systemeinführung der kooperativen Systeme bisher vor allem dadurch erschwert, dass der Nutzen der verschiedenen Subsysteme, Fahrzeug und Infrastruktur, voneinander abhängt. Die Fahrzeuge profitieren erst wirklich, wenn ein größerer Teil der Infrastruktur entsprechend ausgerüstet ist und vice versa, woraus sich ein Henne-Ei-Problem ergibt. Dies gilt vor allem auch für die kooperativen Systeme an signalgesteuerten Knotenpunkten, die der Erhöhung der Verkehrssicherheit dienen. Systeme, die nur auf dem Austausch von Daten zwischen den Fahrzeugen beruhen, sind hier noch mehr im Nachteil, da diese Systeme nur ihre Funktionalität ausschöpfen, wenn zwei ausgestattete Fahrzeuge sich treffen.

Systeme zur Vermeidung von Rotlichtverstößen auf Basis der Infrastruktur-zu-Fahrzeug-Kommunikation können sicherlich hier am schnellsten ihr Potenzial entfalten.

Kollisionsvermeidungssysteme stellen aber zum Teil wesentlich höhere Ansprüche an die Technik als Verfahren zur Effizienzsteigerung. Positionsbestimmung auf Basis von GPS ist von der Genauigkeit nicht ausreichend, da hier die Abweichung in seitlicher und Längsrichtung zu groß sein kann, um verlässlich die Position eines Fahrzeugs zu bestimmen und entsprechend vorzuberechnen. Zusätzliche Sensorik im Fahrzeug ist notwendig,

z. B. Kamera oder Laserscanner, um mittels relativer Positionsbestimmung das Ergebnis zu verbessern. Hierzu bedarf es aber entsprechenden digitalen Kartenmaterialies mit Verortung von Fahrbahnmarkierung oder besonderen Objekten. Aber auch die Intentionserkennung des Fahrers ist entscheidend bei der fahrzeugseitigen Vorausberechnung der Trajektorie, wie diese derzeit in der Forschungsinitiative UR:BAN im Projekt „Mensch im Verkehr“ untersucht wird. Infrastrukturseitige Sensorik kann bei der Identifikation und dem Verfolgen von Objekten an Knotenpunkten unterstützen. Mittels Kameras oder Laserscanner können hier hervorragende Ergebnisse erzielt werden (Pyykonen, Molinier et al. 2010). Die Bereitstellung der Informationen aus diesen unterschiedlichen Quellen über die diversen beweglichen Objekte an einer Kreuzung wirft aber die Frage nach einer robusten und raschen Fusionierung auf. Das Problem der kompetitiven Fusionierung, sprich zwei unterschiedliche Sensoren stellen ähnliche Informationen über eventuell das gleiche Objekt bereit, stellt aus wissen-

schaftlicher Sicht ein interessantes Forschungsfeld dar.

Weiteres Forschungspotenzial kann im öffentlichen Verkehr identifiziert werden: Denn im weitesten Sinne können die bereits zahlreich im Einsatz befindlichen Priorisierungsmaßnahmen des öffentlichen Verkehrs an Lichtsignalanlagen als kooperative Systeme gesehen werden. Die Detektion findet hier in der Regel mittels Baken oder separaten Schleifendetektoren statt, während die Datenübertragung per Funk beispielsweise nach der entsprechenden VÖV-Richtlinie (Verband öffentlicher Verkehrsbetriebe, 1984) vorgenommen wird. Vergleichbare Inhalte von CAM-Nachrichten zur Priorisierung des öffentlichen Nahverkehrs sind im entsprechenden europäischen Standard (ETSI 2011) bereits definiert. Von Interesse wäre an dieser Stelle die Untersuchung des technischen, organisatorischen und wirtschaftlichen Potenzials einer stärkeren Integration der Priorisierungsmaßnahmen für den ÖPNV in den kooperativen Systemverbund. So könnte eine Umrüstung oder ein Neuaufbau der Systeme mit aktuellen Kommunikationstechnologien angestrebt werden, wodurch nicht nur neue Dienste für den ÖPNV denkbar werden, sondern gleichzeitig die Basis für kooperative Systeme für den Individualverkehr geschaffen würde. Weiterer Forschungsbedarf ergibt sich, da die Antriebsart einen zunehmend größeren Einfluss auf die kooperativen Systeme hat. Vorangetrieben durch die Marktdurchdringung elektrisch betriebener Fahrzeuge unterscheiden sich die Fahrzeuge immer mehr in ihrem Verbrauch und den ausgestoßenen Emissionen. Dadurch ergeben sich neue Herausforderungen und Möglichkeiten an eine optimale Fahrzeugführung. Im Gegensatz zu herkömmlichen Verbrennungsmotoren wirken sich beispielsweise Halte von Elektrofahrzeugen weniger stark auf den Verbrauch und die Emissionen aus. Denn Elektrofahrzeuge verbrauchen während des Fahrzeugstillstands keine Energie und sie können Teile der Bewegungsenergie beim Bremsen in elektrische Energie zurückgewinnen. Man könnte also, abhängig vom aktuellen Akku-Ladezustand, eher den Halt eines Elektrofahrzeugs an der LSA in Kauf nehmen als beispielsweise den eines Lkw mit Dieselmotor.

Weitere noch nicht abschließend beantwortete Fragestellungen betreffen die Akzeptanz und Befolgungsrate von Fahrerempfehlungen sowie die Auswirkungen der Beeinflussung einzelner Fahrzeuge auf

nicht ausgestattete Fahrzeuge, insbesondere wenn sie sich im Fahrzeugtyp oder in der Antriebsart unterscheiden. Nicht assistierte Fahrzeuge können möglicherweise das durch eine Empfehlung angepasste Fahrverhalten des Vorderfahrzeugs nicht nachvollziehen und reagieren (aus Sicht der kooperativen Systeme) ungünstig auf die für sie ungewöhnliche Fahrweise. Im Gegensatz dazu könnte es jedoch auch, wie in (Bley, Kutzner et al. 2011) vermutet, zu einem positiven Multiplikatoreffekt kommen, wenn nicht assistierte Fahrzeuge die Fahrweise ausgestatteter Fahrzeuge imitieren. Das Verhalten wird derzeit vom DLR Braunschweig mittels Vernetzung von Fahr simulatoren untersucht (Oeltze und Schießl 2014).

Eine Zusammenfassung des in diesem Kapitel identifizierten Forschungsbedarfs bei kooperativen Lichtsignalsteuerungen ist in Bild 5 dargestellt.

5 Zusammenfassung

Kooperative Lichtsignalsteuerungen eröffnen neue Möglichkeiten zur Verbesserung von Fahrkomfort, Verkehrssicherheit und Verkehrseffizienz. Eine Vielzahl von Funktionen, welche die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur nutzen, ist im Rahmen von nationalen und europäischen Forschungsprojekten entwickelt worden. Dabei kann grob in zwei Hauptkategorien unterschieden werden: (1) Funktionen, welche den Fahrer in seiner Fahrweise beeinflussen und (2) Nutzung der erweiterten Informationsbasis zur Optimierung der Signalsteuerung. Dies kann auch Hand in Hand gehen, wodurch komplizierte und noch weiter zu erforschende Wechselwirkungen entstehen können.

Konkrete Forschungsfragen stellen sich beispielsweise bei der Prognose von LSA-Schaltzeitpunkten und bei der Berücksichtigung der Antriebsarten. Auch im Bereich der Verkehrssicherheit gibt es Forschungsbedarf, da hier höhere Ansprüche an die Positionsbestimmung gelten. Aus dem Grund ist die Intentionserkennung des Fahrers zur fahrzeugseitigen Vorausberechnung der Trajektorie sowie die Fusionierung von Informationen von beweglichen Objekten aus unterschiedlichen Datenquellen Gegenstand aktueller und zukünftiger Forschungsaktivitäten.

Da es bei Systemen, die direkt die Verkehrssicherheit adressieren, auf höchste Zuverlässigkeit ankommt, liegt es auf der

Hand, dass derartige Systeme wohl erst in der zweiten Generation der kooperativen Systeme an lichtsignalgeregelten Knotenpunkten den Schritt aus der Forschungswelt schaffen werden.

Literaturverzeichnis

Alcaraz G., Tsegay, S., Larsson, M., Vernet, G., Koenders, E., Vreeswijk, J., Ophelders, F., Mathias, P., Couly, F., Fernandez, J., Perpey, A., Feringa, M., Annoni, M. (2013): Compass4D – D2.2 Overall reference architecture, Brüssel.

Bley, O., Kutzner, R., Friedrich, B., Saust, F., Wille, M., Maurer, M., Niebel, W., Naumann, S., Wolf, F., Schüller, T., Bogenberger, K., Junge, M., Langenberg, J. (2011): Kooperative Optimierung von Lichtsignalsteuerung und Fahrzeugführung. In: AAET 2011 Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel, Braunschweig.

Braun, R., Busch, F., Kemper, C., Hildebrandt, R., Weichenmeier, F., Menig, C., Paulus, I., PreBlein-Lehle, R. (2009): TRAVOLUTION Netzweite Optimierung der Lichtsignalsteuerung und LSA-Fahrzeug-Kommunikation. Straßenverkehrstechnik, 53, 6, Kirschbaum Verlag, Bonn, S. 365–374.

Busch, F., Kruse, M. (1993): MOTION – Ein neues Verfahren für die städtische Lichtsignalsteuerung und seine Erprobung in Rahmen des EG-Programms ATT. In: HEUREKA '93, Karlsruhe. Directorate General for Energy and Transport, European Commission (2007): Memo – Green Paper “Towards a New Culture for Urban Mobility”, Brüssel.

ETSI – European Telecommunications Standards Institute (2011): TS 102 637-2 Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service, Sophia Antipolis.

Fakler, O., Geßenhardt, J., Lüßmann, J., Busch, F. (2014): Structures of Traffic Management and Control in German Cities. In: 10th ITS European Congress, Helsinki.

Friedrich, B. (1999): Ein verkehrsadaptives Verfahren zur Steuerung von Lichtsignalanlagen. Veröffentlichungen des Fachgebiets Verkehrstechnik und Verkehrsplanung der Technischen Universität München, München.

Hunt, P. B., Robertson, D. I., Bretherton, R. D., Winton, R. I. (1981): SCOOT – a traffic responsive method of coordinating signals. In: TRL Laboratory Report 1014.

Klanner, F. (2008): Entwicklung eines kommunikationsbasierten Querverkehrsassistenten im Fahrzeug (Dissertation), Fachbereich Maschinenbau, Technische Universität Darmstadt.

Krumnow, M. (2012): Schaltzeitprognose verkehrsadaptiver Lichtsignalanlagen im Rahmen des Forschungsprojekts EFA 2014/2. 8. Tagung Verkehrliche Informationsplattform für Management- und Optimierungssysteme, Dresden.

Lüßmann, J., Vreeswijk, J., Katwijk, R., Blokpeol, R., Fullerton, M. (2014): Impact assessment for cooperative urban traffic management applications based on microscopic traffic flow simulation, In: 21th ITS World Congress, Detroit.

Menig, C., Hildebrandt, R., Braun, R. (2008): Der informierte Fahrer – Optimierung des Verkehrsablaufs durch LSA-Fahrzeug-Kommunikation. In: HEUREKA '08, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

Oeltze, K., Schießl, C. (2014): Benefits and challenges of multi-driver-simulator studies. In: 10th ITS European Congress, Helsinki.

Ortgiese, M., Breitenberger, S., Rehborn, H., Poppe, H., Offermann, F., Mann, M. (2011): UR:BAN – Vernetztes Verkehrssystem Vorhabensbeschreibung.

Pyykonen, P., Molinier, M., Klunder, G. A. (2010): Traffic monitoring and modelling for Intersection Safety. In: IEEE 6th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP 2010), Cluj-Napoca.

Rössler, B. (2010): Status of European project INTERSAFE-2 on cooperative intersection safety. IEEE 6th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP 2010), Cluj-Napoca.

Schade, H. J. (2010): 2nd ETSI TC ITS WORKSHOP, Sophia Antipolis.

Schendzielorz, T., Mathias, P., Busch, F. (2014): Vorausberechnung der Trajektorien von Fahrzeugen an städtischen Knotenpunkten. Straßenverkehrstechnik, 58, 8, Kirschbaum Verlag, Bonn, S. 511–520.

sim^{TD}-Konsortium (2010): Versuchsplan 1.0 (Version 3.0), Deliverable 41.1, 2010.

Statistisches Bundesamt (2014): Verkehr – Verkehrsunfälle 2013, Fachserie 8, Reihe 7, Wiesbaden.

Stevanovic, A. Z., Stevanovic J., Ker-gaye, C. (2013): Impact of Signal Phasing Information Accuracy on Green Light Optimized Speed Advisory Systems. In: TRB 92nd Annual Meeting.

Verband öffentlicher Verkehrsbetriebe (1984): VÖV Schrift 04.05.1, Technische Anforderungen an rechnergestützte Betriebsleitsysteme – Übertragungsverfahren Datenfunk; inklusive Ergänzungen von 1987 und 1990. Einkaufs- und Wirtschaftsgesellschaft für Verkehrsbetriebe mbH, Köln.

Weidl, G., Breuel, G. (2012): Overall Probabilistic Framework for Modelling and Analysis of Intersection Situations. In: Advanced microsystems for automotive applications. S. 257–268, Springer, Berlin; New York.

Weisheit, T. (2014): Algorithmenentwicklung zur Prognose von Schaltzeitpunkten an verkehrsunabhängigen Lichtsignalanlagen. In: HEUREKA '14, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

Zimdahl, W. (1983): Wolfsburger Welle – Ein Projekt der Volkswagen Forschung, Forschungsbericht, Volkswagen AG, Wolfsburg.

Zweck, M., Schuch, M. (2013): Traffic light assistant: Applying cooperative ITS in European cities and vehicles, In: 2013 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE), S. 509, Las Vegas.