

Kooperative Optimierung von Lichtsignalsteuerung und Fahrzeugführung

Dipl.-Ing. Oliver Bley, Dipl.-Ing. Ralf Kutzner, Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich
TU Braunschweig, Institut für Verkehr und Stadtbauwesen; Rebenring 31, 38106 Braunschweig
o.bley@tu-braunschweig.de, r.kutzner@tu-braunschweig.de, friedrich@tu-braunschweig.de

Dipl.-Ing. Falko Saust, Dipl.-Ing. Jörn Marten Wille, Prof. Dr.-Ing. Markus Maurer
TU Braunschweig, Lehrstuhl für elektrische Fahrzeugsysteme; Hans-Sommer-Str. 66, 38106 Braunschweig
saust@ifr.ing.tu-bs.de, wille@ifr.ing.tu-bs.de, maurer@ifr.ing.tu-bs.de

Dipl.-Ing. Wolfgang Niebel

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) e.V., Institut für Verkehrssystemtechnik
Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin-Adlershof
wolfgang.niebel@dlr.de

Dipl.-Inf. Sebastian Naumann, Dipl.-Ing. Franziska Wolf

Institut für Automation und Kommunikation, Bereich Verkehrstelematik;
Werner-Heisenberg-Str. 1, 39106 Magdeburg
sebastian.naumann@ifak.eu, franziska.wolf@ifak.eu

Dr.-Ing. Thorsten Schüler, Dr.-Ing. Klaus Bogenberger

Transver GmbH; Maximilianstr. 45, 80538 München
schueler@transver.de, bogenberger@transver.de

Dr.-Ing. Michael Junge, Dipl.-Ing. Jens Langenberg

Volkswagen AG, Konzernforschung Umwelt, Strategie und Mobilität; Brieffach 011/1896, 38436 Wolfsburg
michael.junge@volkswagen.de, jens.langenberg1@volkswagen.de

Kurzfassung

Notwendige Halte an Lichtsignalanlagen und die damit verbundenen Brems- und Beschleunigungsvorgänge beeinflussen wesentlich die Emissionen des städtischen Kraftfahrzeugverkehrs. Weniger Halte bedeuten daher neben einem gleichmäßigeren Verkehrsfluss und weniger Wartezeitverlusten auch geringere Auswirkungen auf die Umwelt.

Der Beitrag stellt ein kooperatives System aus Assistenzsystem und Lichtsignalsteuerung, dessen Komponenten und die zur Anwendung kommenden Verfahren vor, das auf die positive Beeinflussung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten städtischer Netze zielt. Dabei werden erste Ergebnisse der Umsetzung dargestellt. Ferner erfolgen eine Übersicht der vorgesehenen Untersuchungen sowie ein Ausblick auf die erwarteten Potentiale des Systems.

1 Einleitung

Motivation

Die Höhe der Lärm- und Schadstoffemissionen des Kraftfahrzeugverkehrs wird wesentlich durch dessen Beschleunigungsvorgänge beeinflusst. Ein Großteil der Verzögerungs- und Beschleunigungsvorgänge wird im Stadtverkehr durch die Halte an Lichtsignalanlagen (LSA) verursacht. Zugleich gilt, dass durch eine Reduzierung der Halte einzelner Fahrzeuge und einen gleichmäßigeren Verkehrsfluss in städtischen Netzen die negativen Auswirkungen auf die Umwelt verringert werden [UBA, 2010]. Gelingt es, durch eine gute Koordinierung der Steuerung von LSA und durch eine geeignete Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur die Anzahl der Halte im Straßennetz zu minimieren, so ist eine Verbesserung bezüglich der Wartezeiten des Kfz-Verkehrs, der Emissionen insgesamt, der Immissionen im Nahbereich, der Kapazität an Knotenpunkten und der Anfahrverluste angehaltender Fahrzeugen anzunehmen.

Zielsetzung

Um den Verkehrsablauf an Knotenpunkten städtischer Netze positiv zu beeinflussen, wird der Lösungsansatz einer gemeinsamen Optimierung eines kooperativen Systems verfolgt, d.h. sowohl auf Seiten der LSA wie auch fahrzeugseitig Anpassungen vorgenommen. Das beiderseitige Zusammenwirken realisiert erstmals die Optimierung nicht nur der Infrastruktur oder des Fahrerverhaltens sondern eine gemeinsame, gegenseitige Optimierung. Hierdurch ist eine bestmögliche Nutzung der Kapazitäten bei minimalen Kosten zu erzielen. Diese Optimierung zu erreichen ist Ziel des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages geförderten Projekts KOLINE – Kooperative und optimierte Lichtsignalsteuerung in städtischen Netzen.

Zentraler Bestandteil ist eine Evaluierung des Systems im Realbetrieb des öffentlichen Straßenraums. Ein gestuftes Testkonzept ermöglicht es, die relevanten Wirkungen zu Akzeptanz, Verkehrsablauf und Fahrkomfort zu ermitteln, zu analysieren und abschließend in Bezug auf diese Wirkungsdimensionen sowie die Leistungsfähigkeit des Systems zu bewerten.

2 Systemübersicht

Das im Projekt KOLINE entwickelte System umfasst alle notwendigen Komponenten und Teilsysteme, um eine Kooperation von Fahrzeugen und Infrastruktur zu ermöglichen. Zweck dieser Kooperation ist zum einen die Optimierung von Programmen zur Lichtsignalsteuerung

Im KOLINE-Fahrzeug, d.h. eigens ausgestatteten Testträgern, erfolgt die Entwicklung und Umsetzung der optimalen LSA-Annäherungsstrategie mittels eines Verkehrsassistenzsystems. Zusätzlich stellt es für das KOLINE-System Fahrzeugzustandsdaten bereit.

Diese Informationen können in der KOLINE-Zentrale genutzt werden, um durch die Komponente Modellbasierte LSA-Optimierung eine optimierte netzweite LSA-Steuerung zu bestimmen und als Signalprogramm an die KOLINE-LSA zu übermitteln. Diese setzen anschließend die Signalprogramme um, vermitteln Daten und bestimmen den lokalen Verkehrszustand in den Zufahrten des Knotenpunktes. Dazu verfügt jede KOLINE-LSA über eine spezielle Road Side Unit (RSU).

Die KOLINE-RSU ermöglicht die Datenübermittlung zwischen LSA und Fahrzeug [Wolf, 2010] sowie die Anbindung zum Schaltgerät, d.h. zum genutzten LSA-Steuergerät über den aktuellen automotive-WLAN-Standard IEEE 802.11p. Optimierte Signalprogramme können so an das Schaltgerät übergeben und Detektordaten ausgelesen werden. Beim Schaltgerät verbleibt lediglich die verkehrstechnische Absicherung. Die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und LSA basiert auf den im Forschungsprojekt sim^{TD} definierten Kommunikationsprotokollen [sim^{TD} , 2009]. Hierdurch werden die Anwendungen beider Forschungsprojekte zueinander kompatibel.

Die Bestimmung des lokalen Verkehrszustandes erfolgt durch drei einzelne Komponenten. TRANSQest schätzt den Rückstau eines Fahrstreifens anhand des dort befindlichen Detektors. Die Fahrzeugdatenbasierte Rückstauschätzung ermittelt den Rückstau eines Fahrstreifens anhand der Positions- und Geschwindigkeitsmeldungen von KOLINE-Fahrzeugen. Die Zusammenführung der Informationen beider Komponenten erfolgt in TRANSFusion.

3 Kooperative Optimierung der Lichtsignalsteuerung

Grundlage für die Berechnung der Signalprogramme sind aktuelle Messdaten des Verkehrszustandes für definierte Optimierungsintervalle von 15 Min Länge. Während des ersten Zeitintervalls werden Messdaten aus stationären Detektoren erhoben, aggregiert und an die Komponente Modellbasierte LSA-Optimierung übermittelt. Inwieweit zusätzlich Fahrzeugzustandsdaten der KOLINE-Fahrzeuge genutzt werden können, bzw. dies die Prognose der Verkehrsnachfrage verbessert, ist Gegenstand der Untersuchungen im Projekt.

Im folgenden Zeitintervall wird mit diesen Messdaten die Verkehrsnachfrage des dritten Zeitintervalls als Quelle-Ziel-Matrix prognostiziert. Zu diesem Prozess gehört auch der Einsatz eines Vervollständigungsalgorithmus, um fehlende Kantenbelastungen abzuleiten. Für die

prognostizierte Nachfrage werden optimierte Signalprogramme in Form von Festzeitprogrammen für jeden Knotenpunkt bestimmt und vor Ablauf des zur Berechnung genutzten Optimierungszeitraums an die KOLINE-RSU übermittelt. Abbildung 3 zeigt den Ablauf innerhalb der Teilsysteme KOLINE-LSA und KOLINE-Zentrale für die einzelnen Zeitintervalle.

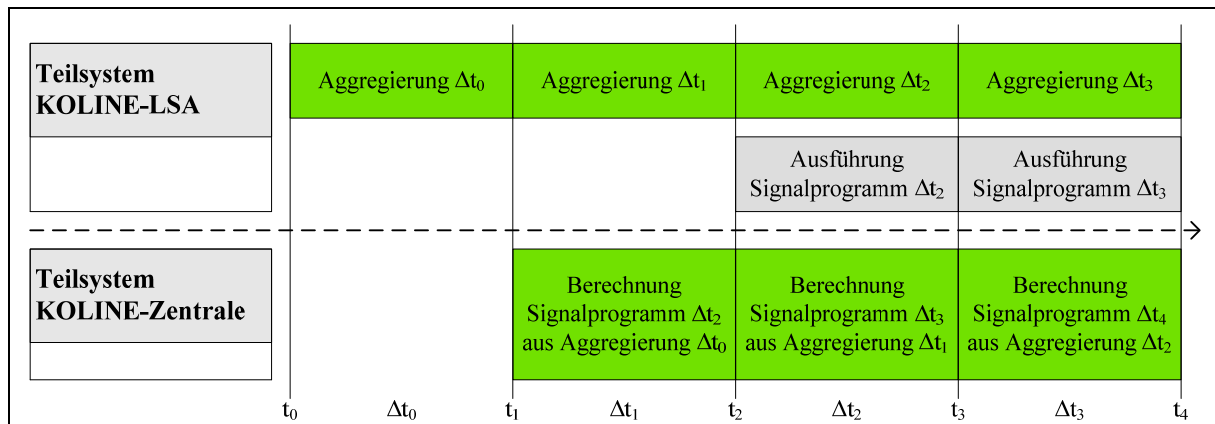


Abbildung 3: Ablaufschritte der Datengewinnung, Berechnung und Umsetzung der Signalprogramme

Maßgebende Einflussgrößen zur Netzkoordinierung sind Versatzzeit und Progressionsgeschwindigkeit. Der Nutzen einer modellbasierten Versatzzeitoptimierung konnte bereits in verschiedenen Simulationsstudien nachgewiesen werden [Friedrich, 2005; Pohlmann, 2010]. Bislang wird in der Optimierung jedoch eine konstante Progressionsgeschwindigkeit (z.B. 50 km/h) angenommen. Bei einer zusätzlichen Berücksichtigung der Progressionsgeschwindigkeit in der Optimierung wird daher eine weitere Verbesserung des Verkehrsflusses bzw. Minimierung von Kraftstoffverbrauch und Emissionen angenommen.

Anhand eines makroskopischen Verkehrsflussmodells, dem so genannten Cell Transmission Model (CTM), werden die Wirkungen unterschiedlicher Kombinationen von Versatzzeiten und Progressionsgeschwindigkeiten der einzelnen LSA für die Hauptströme bewertet und optimiert. Die Auswahl eines optimalen Signalprogramms erfolgt anhand der Bewertung einer Zielfunktion, die u.a. die Gesamtzahl der Halte sowie die Gesamtverlustzeiten enthält.

4 Verkehrszustandsanalyse

Frühere Forschungsarbeiten zur optimierten Annäherung an Knotenpunkte haben gezeigt, dass die Berücksichtigung von Rückstau weiterer Forschung bedarf [Menig, 2008]. Im Projekt KOLINE kommt daher der Bestimmung und Bereitstellung genauer Informationen über den aktuellen Verkehrszustand zwischen aktueller Position des Fahrzeugs und Haltlinie der LSA eine zentrale Bedeutung zu. Hierbei hat gerade die Kenntnis des aktuellen Rückstaus großen Einfluss, um die Annäherung von Fahrzeugen an eine LSA zu optimieren.

Grundvoraussetzung für alle Verkehrszustandsanalysen ist die Verfügbarkeit aktueller Messdaten. Im Bereich einer LSA können diese mittels stationärer Detektoren erhoben werden. Diese vorhandene Infrastruktur bildet die Basis der Rückstauschätzung. Für eine zusätzlich verbesserte Bestimmung des aktuellen Verkehrszustands in den Zufahrten von LSA werden im Projekt KOLINE fahrzeugdatenbasierte Verkehrszustandsgrößen in die Berechnung der aktuellen Verkehrslage integriert.

Rückstauschätzung über haltliniennahe Detektoren

Mit der Komponente TRANSQest wird in KOLINE ein erprobtes Schätzverfahren zur Ermittlung der maximalen Länge eines Rückstaus vor LSA eingesetzt, das die herkömmlichen Detektor- und Signaldaten von LSA verwendet und auch im überlasteten Verkehrszustand betrieben werden kann [Mück, 2002]. Abbildung 4 zeigt exemplarisch die erreichbare Qualität der Rückstauschätzung dieser Komponente.

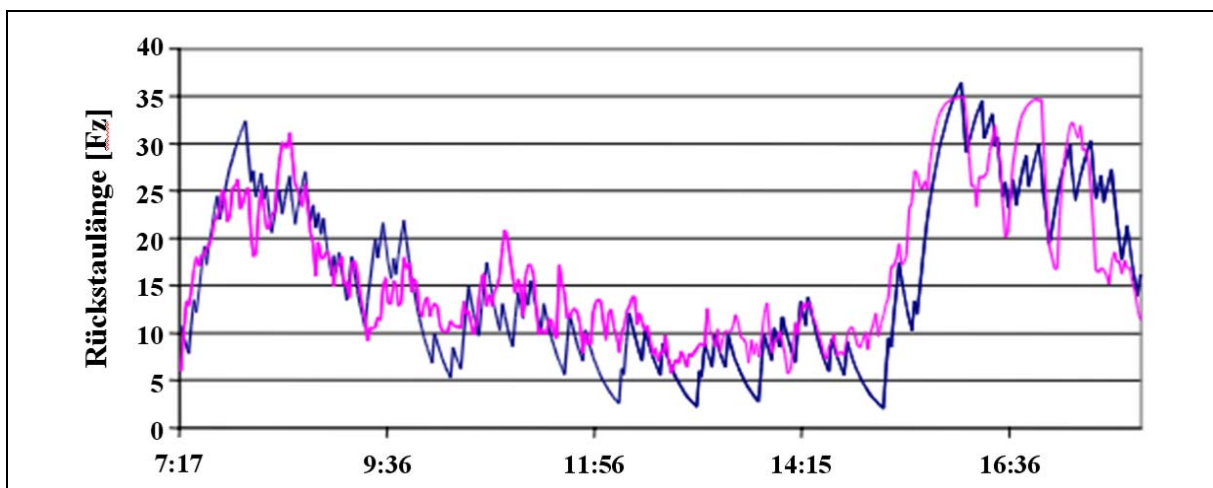


Abbildung 4: Rückstauschätzung der Komponente TRANSQest, real (rosa) und geschätzt (blau)

TRANSQest macht sich die oft in den Zufahrten einer LSA vorhandenen haltliniennahen, d.h. ca. 30-60 m vor der Haltlinie verbauten Detektoren zu nutze. Mittels dieser vielfach „mitten im Stau“ liegenden Zeitlücken-Detektoren kann TRANSQest einmal je Umlauf einer LSA online Rückstaulängen bis etwa zum 5-10fachen des Abstands Detektor - Haltlinie ermitteln. Maßgebliche Größe hierbei ist die Füllzeit, die vom Sperrbeginn eines Signals bis zur Dauerbelegung eines Detektors verstreicht. Aus ihr lässt sich ableiten, ob sich Fahrzeuge zum Zeitpunkt des Freigabendes schnell oder langsam an die LSA annähern.

Treten in lichtsignalisierten Zufahrten Stauungen auf, die auch nach Ende einer Freigabe nicht aufgelöst sind, so stellen sich die nicht abgeflossenen Fahrzeuge schneller wieder hinter der Haltlinie des Signals auf, als wenn sie sich in freier Fahrt befunden haben. Die Füllzeit unter-

schreitet in diesem Fall signifikant häufig eine bestimmte, vom Abstand Detektor - Haltlinie abhängige Referenzdauer. Empirische Daten zeigen, dass die Häufigkeit der Unterschreitung dieser Vergleichsdauer bis zu einem gewissen Grad mit der Staulänge korreliert: Das Ereignis „Unterschreiten der Referenzdauer“ wird durch einen Stau-Kennwert d formuliert. Über Korrelationsrechnung kann ein Zusammenhang zwischen diesen stetigen Werten in der Form einer Ursprungs-Regressionsgeraden hergestellt werden.

Liegt der Stau-Kennwert d aus Messungen vor, kann bei einer gegebenen Steigung m auf die Rückstaulänge geschlossen werden, was eine Bestimmungsgleichung zur Berechnung einer unbekannt maximalen Rückstaulänge ermöglicht.

Auswertungen haben gezeigt, dass die Steigung m für jeden Detektor individuell festgelegt werden muss, da sie nicht nur vom Abstand zwischen Detektor und Haltlinie, sondern auch von Eigenschaften des Verkehrsflusses abhängt. Die erforderliche Kalibrierung dieses Parameters lässt sich online durchführen, wenn neben der Füllzeit auch die Anzahl der während der Freigabe abgeflossenen Fahrzeuge ausgewertet wird.

Das auf dem Detektor zum Halt kommende Fahrzeug bestimmt die Dauer der Füllzeit. Ist dieses Fahrzeug sehr kurz nach Beginn der Sperrzeit zum Stehen gekommen, ist mit hoher Wahrscheinlichkeit darauf zu schließen, dass es sich innerhalb eines langsam fahrenden Pulks fortbewegt hat, wie er bei Rückstauungen typisch ist. Da der Fahrzeugpulk bis zum detektierten Fahrzeug stromaufwärts des Detektors im Stau gestanden hat, lässt sich in Verbindung mit einer durchschnittlichen Zahl stromabwärts des Detektors stehenden Fahrzeugen eine Ungleichung für die tatsächliche maximale Rückstaulänge ableiten. Überschreitet die Füllzeit den Referenzwert, gilt die Ungleichung mit umgekehrter Relation.

Rückstauschätzung mittels Fahrzeugzustandsdaten

Grundprinzip der Rückstauschätzung mittels Fahrzeugzustandsdaten ist die Betrachtung des Verkehrsablaufs an signalgesteuerten Knotenpunkten als Kombination von Ankunfts- und Abfertigungsprozess. Die auf den Knotenpunkt zufahrenden Fahrzeuge müssen dort, falls das Signal Rot zeigt, auf eine Abfertigung warten. Die Anzahl dieser wartenden Fahrzeuge bildet den Rückstau. Unter Berücksichtigung der Fahrzeuglängen ergibt sich die Rückstaulänge.

Sind einzelne KOLINE-Fahrzeuge unter den ankommenden Fahrzeugen, kommunizieren diese sekundlich aktuelle Fahrzeugzustandsdaten (Geschwindigkeit und Position). Diese Daten werden genutzt, um die Ankunftsrate a sowie Abfertigungs- bzw. Abflussrate b zu bestimmen. Die Bestimmung der Ankunftsrate a erfolgt mittels der Daten von KOLINE-

Fahrzeugen, die am Ende des Rückstaus zum Stehen kommen durch Abgleich von Rückstaulänge bei Rotbeginn, Rotdauer sowie Position an des stehenden KOLINE-Fahrzeugs. Für die Bestimmung der Abflussrate b wird zuerst die Zeitdauer bestimmt, welche das letzte KOLINE-Fahrzeug im Rückstau benötigt, um nach Beginn der Freigabezeit anzufahren.

Sowohl Ankunfts- als auch Abflussrate lassen sich somit anhand aktueller Fahrzeugzustandsdaten berechnen. Die ermittelten Raten sind so lange gültig, bis Daten eines weiteren KOLINE-Fahrzeugs zur Verfügung stehen und eine Neuberechnung der Raten ermöglichen. Die Fragestellung, inwieweit ältere Schätzwerte gewichtet bei der Bestimmung des aktuellen Messwerts eingehen sollten, ist Untersuchungsgegenstandes innerhalb des Projektes.

Mit den geschätzten Ankunfts- und Abflussraten sowie den bekannten Umschaltzeitpunkten (Rotbeginn, Rotende) lassen sich zu jedem Zeitpunkt die aktuelle Rückstaulänge, der im momentanen Umlauf zu erwartende maximale Rückstau und der Zeitpunkt bis zur freien Passierbarkeit, d.h. dem vollständigen Abbau des Rückstaus bestimmen (vgl. Abbildung 5).

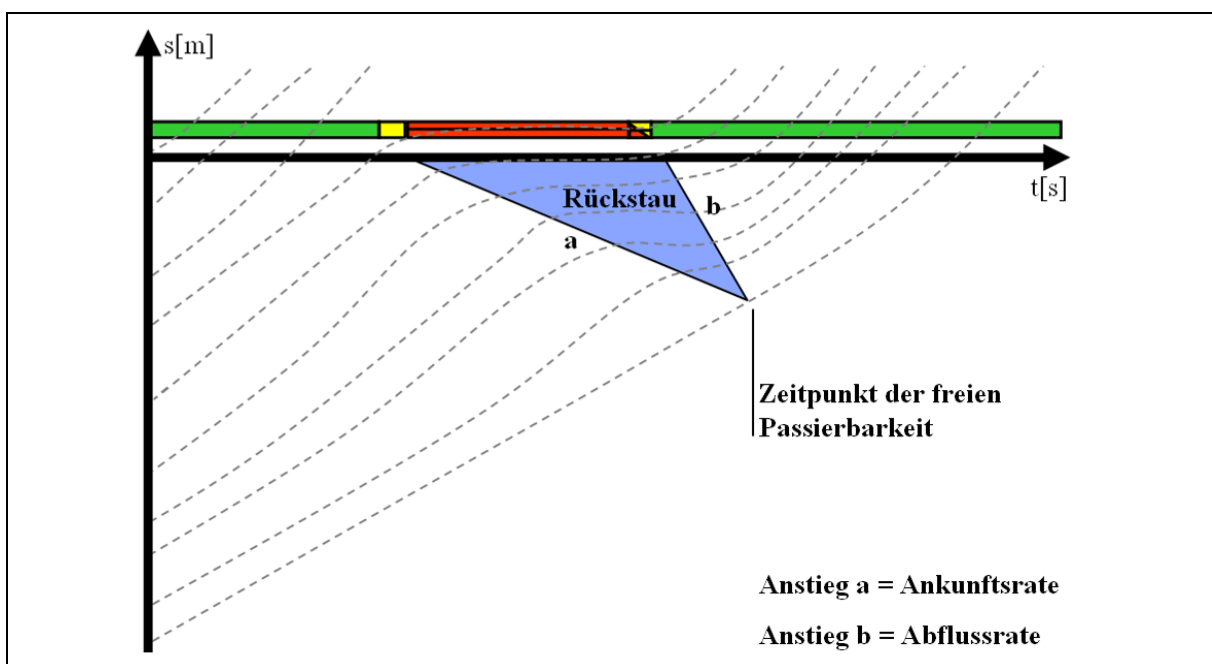


Abbildung 5: Veranschaulichung der Rückstaubildung und -auflösung am signalgesteuerten Knotenpunkt

Jeder berechneten Rückstauschätzung soll ein Gütemaß zugeordnet werden, das direkt vom Alter der zu Grunde liegenden Fahrzeugzustandsdaten abhängt: Je älter der Messwert ist, als desto weniger genau gilt die Schätzung. Es erscheint sinnvoll, das Gütemaß in Form eines Konfidenzintervalls und Konfidenzniveaus für jeden Schätzwert anzugeben.

Für die implementierte Methodik liegen erste Simulationsergebnisse vor. Abbildung 6 zeigt eine Simulation von drei Umläufen.

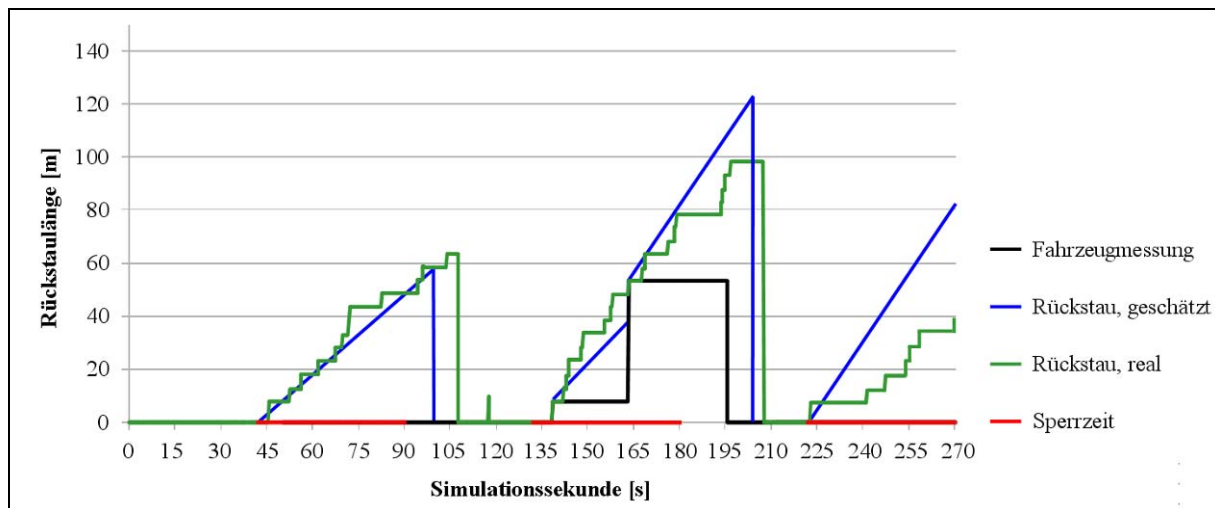


Abbildung 6: Rückstauschätzung der Komponente Fahrzeugdatenbasierte Rückstauschätzung

Im ersten der drei Umläufe ist kein KOLINE-Fahrzeug vorhanden, die Rückstauschätzung erfolgt daher allein auf Grundlage eines vorgabewertes z.B. aus dem vorherigen Umlauf. Während des zweiten Umlaufs kommen zwei KOLINE-Fahrzeuge im Rückstau zum Stehen (etwa bei 6 m und 48 m). Durch die Verkehrszustandsdaten beider Fahrzeuge wird die geschätzte Ankunftsrate angepasst (Anstieg der blauen Linie).

Fusionierte Rückstauschätzung

Die Komponente TRANSQest schätzt in festen Zyklen den maximalen Rückstau in Zufahrten von LSA. Die Dauer dieser Zyklen entspricht den Umlaufzeiten der LSA in einer Größenordnung von 60 bis 120 Sekunden, was für die Optimierung einer Anfahrstrategie zu lang ist. Verkehrszustandsdaten der KOLINE-Fahrzeuge können zur punktuellen Rückstauschätzung in der Komponente Fahrzeugdatenbasierte Rückstauschätzung genutzt werden. Aufgrund des Durchdringungsgrades liegen diese Werte aber nur unregelmäßig vor und reichen für eine permanente Schätzung des aktuellen Rückstaus nicht aus. Durch die Kombination und Fusion beider Verfahren zur Rückstauschätzung kann die Komponente TRANSFusion über den gesamten Zeitraum aktuelle maximale Rückstaulängen detektierter Zufahrten schätzen.

Die Zusammenführung der ermittelten Rückstaulängen basiert auf einer zweidimensionalen Datenfusion. Eine Achse bildet die Fusionierung der geschätzten Rückstaulänge, die zweite Achse die Fusionierung der Daten unter Berücksichtigung der Zeitpunkte, zu denen die Rückstauwerte geschätzt wurden.

Als Berechnungsbasis werden die geschätzten Rückstauwerte $R(TQ)$ der Komponente TRANSQest herangezogen, da diese dauerhaft im Abstand der Umlaufzeiten der jeweiligen

LSA vorliegen. Ist ein Umlauf abgeschlossen, schätzt TRANSQest den maximalen Rückstau, welcher für den Zeitpunkt der Schätzung als sicherer Wert angenommen wird.

Für jede Sekunde, in der TRANSFusion einen Rückstauwert liefern soll, wird im ersten Schritt der zuletzt geschätzte Rückstauwert von TRANSQest $R(TQ)$ zuzüglich eines Prognoseanteils zurückgeliefert. Der Prognoseanteil wird benötigt, da sich der Rückstau in der Zeit zwischen der letzten Schätzung durch TRANSQest bis zur nächsten Schätzung von TRANSQest sehr wahrscheinlich verändert. Der Prognoseanteil hat die Form ähnlich eines Trichters und wird durch zwei Grenzfunktionen gebildet.

Die erste Grenzfunktion ist die Zuwachsfunktion $Z(s)$. Bei dieser Funktion wird von einer Zunahme des Rückstaus ausgegangen. Die Zuwachsfunktion ist entweder eine lineare Funktion mit einer Steigung, welche aus den letzten geschätzten Rückstauwerten ermittelt wird, oder eine erweiterte Funktion, welche zusätzlich das Abflussverhalten in Abhängigkeit der Freigabezeiten berücksichtigt. Die Abflussfunktion $A(s)$ ist die zweite Grenzfunktion. Diese unterstellt, dass sich der Rückstau abbaut und keine neuen Fahrzeuge den vorhandenen Rückstau verlängern. Liegen zu einer bestimmten Sekunde zusätzliche Rückstauschätzungen durch die Komponente Fahrzeugdatenbasierte Rückstauschätzung vor, lassen sich die Funktionen $Z(s)$ und $A(s)$ entsprechend modifizieren.

5 Assistenzfunktionen für kooperatives Fahren im Stadtverkehr

Kooperative Assistenzsysteme erfordern die Kommunikation zwischen Fahrzeugen untereinander bzw. zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur. Der Anwendungsfall eines Assistenzsystems zur optimalen LSA-Annäherung bedarf der in Abbildung 7: dargestellten Daten.

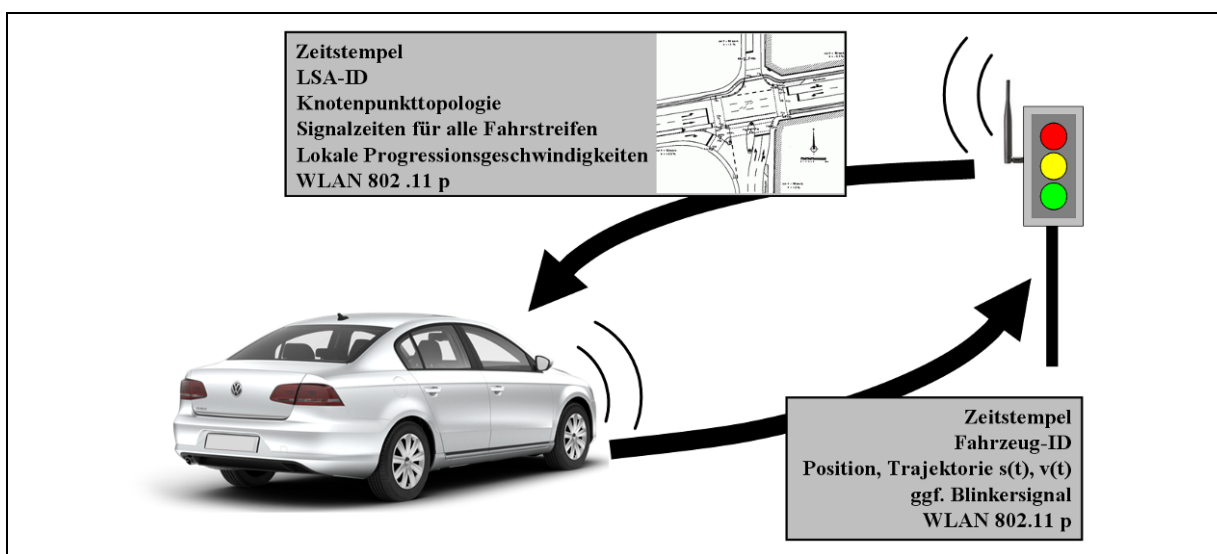


Abbildung 7: Schema der Kommunikation zwischen KOLINE-Fahrzeug und KOLINE-LSA

Mit Hilfe der an das Fahrzeug kommunizierten Daten werden in KOLINE verschiedene Varianten eines Verkehrsassistenzsystems zur optimalen LSA-Annäherung realisiert. Zwei regelnde Varianten werden nachfolgend dargestellt. Ergänzend wird auch ein Informationssystem betrachtet, das dem Fahrer Restrotzeiten bzw. die optimale Geschwindigkeit zum Passieren der LSA anzeigt. Der Fahrer muss dann mit Hilfe dieser Informationen sein Fahrverhalten an die Situation am Knotenpunkt selbst anpassen. Vorteilhaft für alle Varianten ist die durch die Festzeitsteuerung ermöglichte Bereitstellung verlässlicher Informationen zu Freigabe- und Sperrzeiten.

Längsgeregeltes Fahren

Das Assistenzsystem zur Längsregelung basiert auf der Serientechnik eines adaptiven Abstands- und Geschwindigkeitsregelung (engl.: Adaptive Cruise Control, ACC). Dieses erfasst mit Hilfe eines Abstandssensors das vorausliegende Umfeld, um Geschwindigkeit und Abstand des Fahrzeugs an das vorausfahrende Fahrzeug anpassen zu können. Der Funktionsumfang eines ACC-Systems wird durch die Implementierung von adaptiven Fahrstrategien für die Annäherung an eine LSA erweitert. Dabei wird ein auf dem Intelligent Driver Model (IDM) basierender Regelalgorithmus verwendet. Dieser Ansatz gewährleistet insbesondere die Kolonnenstabilität.

Für die optimierte LSA-Annäherung kommen verschiedene Strategien zur Anwendung:

1. Freie Fahrt:

Bei Konstantfahrt mit der im ACC-System eingestellten Wunschgeschwindigkeit ist das Passieren während der Freigabezeit ohne Eingriff des Assistenzsystems möglich.

2. Boost:

Durch die kurzfristige Erhöhung der Wunschgeschwindigkeit bis maximal zur erlaubten Höchstgeschwindigkeit ist gerade noch das Passieren der LSA möglich.

3. Anhalten:

Das Fahrzeug nähert sich einer LSA während der Sperrzeit an. Ohne das Unterschreiten einer Mindestgeschwindigkeit ist ein Halt nicht zu vermeiden.

4. Motorbremse:

Das Fahrzeug bremst entweder nur per Motorbremse oder durch eine Kombination aus komfortabler Verzögerung und Motorbremse gezielt auf den von der KOLINE-RSU bereitgestellten Zeitpunkt und Ort der freien Passierbarkeit ab.

Abbildung 8: visualisiert die vier LSA-Annäherungsstrategien in Form von Annäherungstrajektorien ohne die Berücksichtigung eines Rückstaus. Farblich dargestellt ist dabei die Fahrzeuggeschwindigkeit der einzelnen Trajektorien.

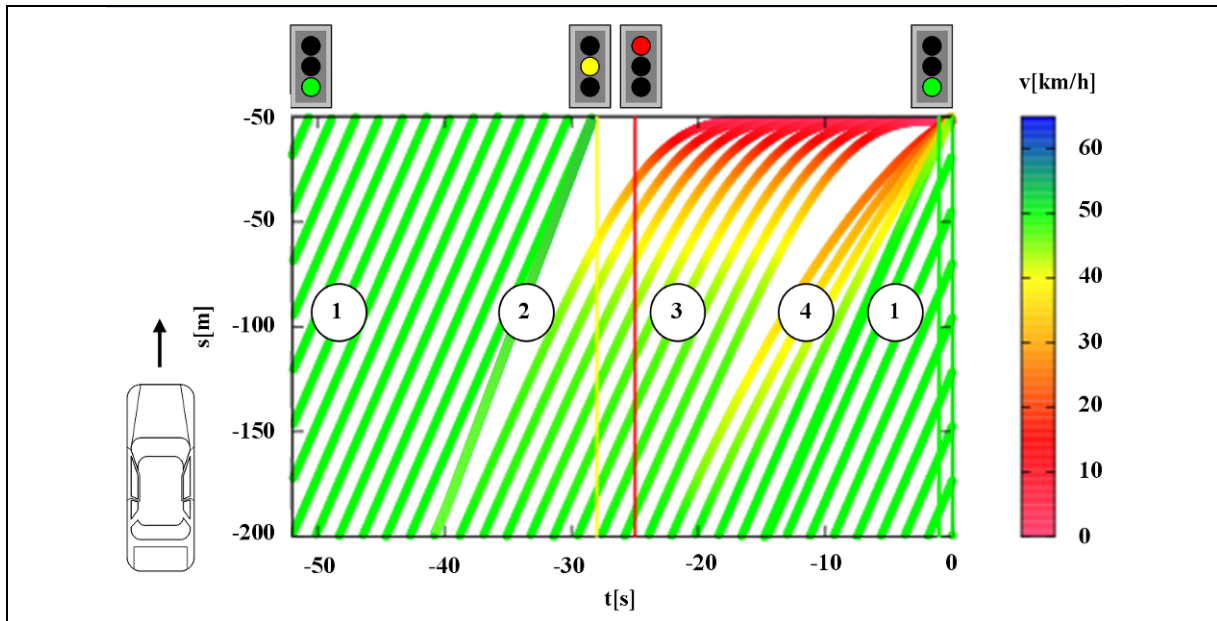


Abbildung 8: Annäherungstrajektorien eines KOLINE-Fahrzeugs an eine KOLINE-LSA

Um das Potential des Assistenzsystems abschätzen zu können, wurden erste Simulationen durchgeführt, in denen sich ein einzelnes isoliertes Fahrzeug einer LSA annähert. Ohne die Berücksichtigung zusätzlicher Verkehrsteilnehmer kann so in einem ersten Schritt die Wirkung der optimierten Annäherung auf das Einzelfahrzeug untersucht werden. Dabei wurden verschiedene Parameter (z.B. Umlaufzeiten der LSA, Annäherungsgeschwindigkeiten der Fahrzeuge) variiert. Nachfolgend sind zentrale Ergebnisse zusammengefasst:

- **Anzahl der Halte:**
Für die einzelnen Annäherungsstrategien konnte eine zum Teil deutliche Reduktion der Anzahl der Halte festgehalten werden. Durch Einsatz der Strategie Motorbremse liegt diese bei 17 % bis 23 %. In der Kombination mit der Strategie Boost können bis zu 30 % der Halte vermieden werden.
- **Kraftstoffverbrauch:**
Erste Abschätzungen mit empirischen Motorkennfeldern ergeben Kraftstoffeinsparungen von etwa 3 % bis 5 %.

Weitergehende Untersuchungen werden das Verhalten eines KOLINE-Fahrzeugs in einem belasteten Straßennetz, insbesondere auch die Interaktion mit nicht ausgestatteten Fahrzeugen, simulativ behandeln. In diesem Szenario werden auch Informationen zum Rückstau ver-

arbeitet. Darüber hinaus ist zu untersuchen, welchen Einfluss der Ausstattungsgrad auf die positiven verkehrlichen Effekte hat. Aufgrund der Interaktion eines ausgerüsteten Fahrzeugs mit nachfolgenden Verkehrsteilnehmern wird in bestimmten Situationen sogar ein Multiplikatoreffekt erwartet, so dass auch nicht ausgestattete Fahrzeuge profitieren.

Vollautomatisches Fahren

Eine zusätzliche Optimierung des Verkehrsflusses wird neben der Anpassung der automatischen Längsführung durch die Automatisierung der Querführung angestrebt [Saust, 2010]. Zu diesem Zweck kommt ein mit aktueller Prototypen- und Vorseriensensorik ausgestatteter Testträger zum Einsatz, der im Projekt Stadtpilot bereits erste vollautomatische Fahrten auf dem Braunschweiger Stadtring absolviert hat [Wille, 2010; TU, 2010]. Grundlage des vollautomatischen Fahrens ist der im Vergleich zur Serientechnik deutlich vergrößerte Erfassungsbereich der Sensorik und das daraus aufgebaute erweiterte Umfeldmodell. Ziel ist es, zu untersuchen, inwieweit dadurch eine Funktionssteigerung des Verkehrsassistenzsystems möglich ist.

Die Optimierung der Fahrstrategie basiert zunächst auf fahrstreifengenauen Informationen zum aktuellen Verkehrszustand, mit denen ein präferierter Fahrstreifen bestimmt werden kann. Die benutzten Daten beinhalten u.a. den aktuellen Rückstau je Fahrstreifen, die durchschnittlichen Verkehrsstärken und die Progressionsgeschwindigkeiten. Zusammen mit den analysierten Umfelddaten können neben der optimierten Längsführung verschiedene Ausbaustufen der Querführung im Testträger realisiert werden. Im ersten Schritt ist eine Empfehlung zum Wechsel des Fahrstreifens, in der nächsten Ausbaustufe ein aktiver Eingriff in die Querführung des Fahrzeugs vorgesehen.

Zur Generierung hinreichend genauer Umfelddaten sind unterschiedliche Anforderungen zu erfüllen. Hierzu gehört z.B. die frühzeitige Detektion stehender Fahrzeuge am Ende des Rückstaus. Zusätzlich ist die Erfassung von Fahrzeugen auf den Nachbarfahrstreifen erforderlich, wodurch ein ausreichend großer Öffnungswinkel sowie die Überwachung des „toten Winkel“-Bereiches notwendig wird. Die automatisierte Durchführung eines Fahrstreifenwechsels stellt zudem hohe Anforderungen an die Erfassung des rückwärtigen Verkehrs. Einen Überblick über die eingesetzte Sensorik vermittelt Abbildung 9. Im Verlauf des Projekts werden zudem unterschiedliche Sensorkonfigurationen evaluiert, um den Nutzen der verschiedenen möglichen Sensordaten für die Optimierung der Fahrstrategie bestimmen zu können.

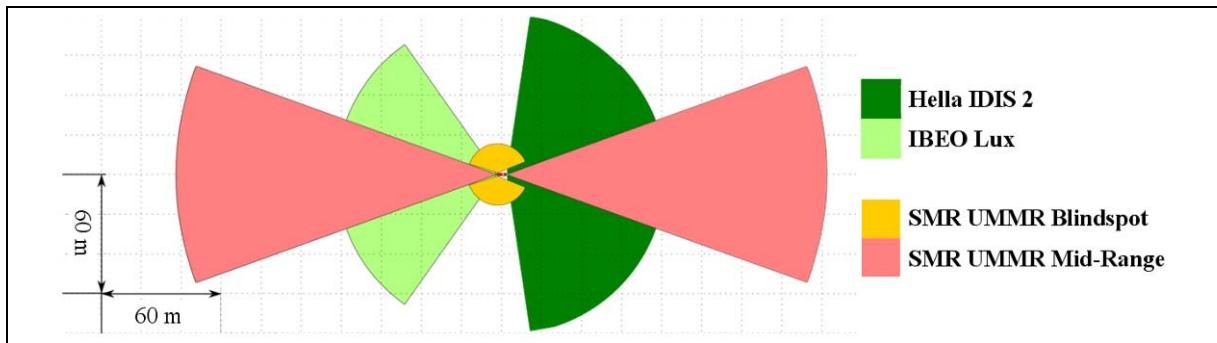


Abbildung 9: Erfassungsbereiche der Sensorik

Die Daten aller verwendeten Sensoren werden mittels einer Sensordatenfusion zu einem konsistenten Abbild der Umgebung zusammengeführt. Die so fusionierten Sensordaten und die von der KOLINE-RSU empfangenen Daten zum Verkehrszustand stellen damit die Eingangsdaten für eine umfassende Situationsanalyse dar (vgl. Abbildung 10). Auf dieser Basis wird eine optimierte Fahrstrategie ermittelt und anschließend durch den Testträger umgesetzt.

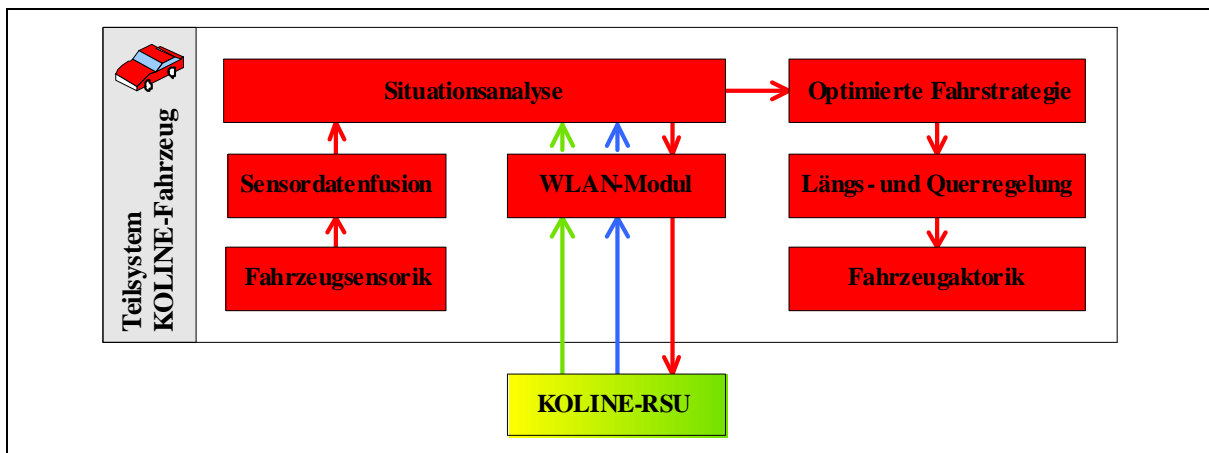


Abbildung 10: Vereinfachte Systemarchitektur des längs- und quergeregelten KOLINE-Fahrzeugs

Zur Abschätzung des Potentials einer optimierten Längs- und Querregelung, wurden erste Voruntersuchungen auf dem Braunschweiger Stadtring durchgeführt. Insgesamt wurden an verschiedenen Werktagen zu unterschiedlichen Zeiten 14 Testfahrten aufgezeichnet und dabei zwei Fahrstrategien verglichen. Die erste repräsentiert einen Fahrer, der nur auf einem Fahrstreifen verbleibt und diesen nicht wechselt, während die zweite Strategie einen Fahrer mit vorausschauender Fahrweise abbildet, der zur Vermeidung unnötiger Halte frühzeitig den Fahrstreifen wechselt. Im Ergebnis resultiert diese Fahrstrategie in einem deutlich flüssigeren Fahrverhalten mit verringerten Beschleunigungs- und Bremsvorgängen und somit auch in einem reduzierten Energieverbrauch des Fahrzeugs. Die Reduzierung der notwendigen Halte an LSA durch eine vorausschauende Fahrweise spiegelt sich darüber hinaus in der Verringerung der benötigten Zeitdauer um 17 % sowie in einer höheren Durchschnittsgeschwindigkeit

wider (s. Tabelle 1). Mittels detaillierter Informationen zum Verkehrszustand ist eine weitere Verbesserung zu erwarten.

	ohne Fahrstreifenwechsel		mit Fahrstreifenwechsel	
Länge	Zeitdauer	Durchschnittsgeschwindigkeit	Zeitdauer	Durchschnittsgeschwindigkeit
10 km	22:26 min	26,8 km/h	18:43 min	32,1 km/h

Tabelle 1: Vergleich zweier Fahrstrategien

6 Evaluierung des Systems

Die Entwicklung des KOLINE-Systems ist auf eingehende Untersuchungen von Funktion und Wirkung unter verschiedenen Rahmenbedingungen ausgerichtet. Explizit wurden die Untersuchungsgegenstände Verkehrseffizienz (unter Beibehaltung der Verkehrssicherheit), Ökologie und Akzeptanz des KOLINE-Systems formuliert. Hierzu ist ein gestuftes Demonstrationskonzept vorgesehen, das aufeinander aufbauende Untersuchungen in drei Testfeldern beinhaltet. Ziel ist insbesondere die Anwendung im Realbetrieb des öffentlichen Straßenraums, um die Praxistauglichkeit des kooperativen Systems und die Effekte für ausgestattete wie auch für nicht ausgestattete Fahrzeuge nachzuweisen.

Übergeordnete Anforderung an die gesamte Evaluation ist die Abstimmung der Untersuchungen mit den Zielen und Aktivitäten des Projektes „Anwendungsplattform Intelligente Mobilität“ (AIM), in dem derzeit durch den Projektpartner Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) e.V. in der Region Braunschweig eine offene Plattform für modernste Mobilitätsanwendungen in einem realen Umfeld aufgebaut wird [DLR, 2010].

Technisches Prüffeld

Nachdem die Funktion der einzelnen Systemkomponenten getrennt von einander untersucht wurde, wird das Gesamtsystem zunächst auf einem abgesperrten, nicht öffentlichen Gelände getestet. Die Ausdehnung dieses Testgeländes gewährleistet sowohl die Nachbildung von Knotenpunkten als auch die ungestörte Anfahrt der ausgestatteten Testträger auf diese Knotenpunkte. Die vorhandene Bebauung aber auch Bäume bilden die innerstädtischen Bedingungen für die Ausbreitung der WLAN-Daten hinreichend genau ab, wodurch für die KOLINE-RSU Annahmen zur Reichweite getroffen und sinnvolle Standorte an den Knotenpunkten bestimmt werden können. Vor dem Einsatz des KOLINE-Systems im öffentlichen Straßenraum können somit technische Untersuchungen unter möglichst realitätsnahen Bedingungen erfolgen. Durch verschiedene Serien von Messfahrten mit den Versuchsträgern können differenziert Szenarien der optimierten Annäherung an die LSA betrachtet werden. Der

reale Aufbau und Betrieb sowie die eingehende Prüfung der optimierten Lichtsignalsteuerung dienen zudem dazu, alle notwendigen Nachweise zu erbringen, um einen Einsatz der entwickelten Verfahren im öffentlichen Straßenraum des Demonstrationsfeldes zu ermöglichen.

Als Ergebnis liefern die durchgeführten technischen Tests Informationen über Einsatzbereiche und -grenzen der im Gesamtsystem implementierten Verfahren der Lichtsignalsteuerung sowie der Kommunikationseinrichtungen und Assistenzsysteme, bevor diese unter realen Bedingungen im Demonstrationsfeld, d.h. dem realen Straßenraum eingesetzt werden.

Demonstrationsfeld

Nach Abschluss der Untersuchungen im technischen Prüffeld erfolgt die Übertragung in das Demonstrationsfeld. Dieses besteht aus einem Straßenzug von drei benachbarten Knotenpunkten auf dem Braunschweiger Stadtring. Dieser teilweise baulich getrennte, zweistreifige Stadtring gehört mit bis zu 27.000 Fahrzeugen je Fahrtrichtung und Tag zu den zentralen innerstädtischen Verkehrsadern der Stadt. Abbildung 11 zeigt den im vorgesehenen Demonstrationsfeld zentral gelegenen Knotenpunkt.



Abbildung 11: Zentraler Knotenpunkt des vorgesehenen Demonstrationsfeldes

Unter realen verkehrlichen Bedingungen lassen sich gegenüber dem technischen Prüffeld weitere technische Kenngrößen erheben und der Aspekt der Fahrerakzeptanz untersuchen. Hierfür sind weitere Serien von Messfahrten durch Mitarbeiter der Projektpartner mit den Versuchsträgern vorgesehen, bei denen Reisegeschwindigkeit, Fahrzeit, Wartezeit und Anzahl der Halte sowie das realisierte Fahrprofil (Geschwindigkeit, Beschleunigung, Verzögerung) ermittelt werden. Um Verkehrsstärken sowie Reisegeschwindigkeit und Fahrzeit aller Fahr-

zeuge im Demonstrationsfeld zu erheben, werden Verkehrszählungen mit automatischen Kennzeichenerfassungssystemen durchgeführt.

Virtuelles Testfeld

Die beiden realen Testfelder werden durch begleitende Verkehrssimulationen im virtuellen Testfeld flankiert. Hierin kann unter kontrollierbaren Randbedingungen für das Gebiet des Demonstrationsfeldes die Wirkung der Assistenzfunktionen auf den Verkehrsfluss, die verkehrsbedingten Emissionen sowie den Kraftstoffverbrauch bei unterschiedlichen Ausstattungsraten in effektiver Form bestimmt werden.

Das virtuelle Testfeld behandelt nicht nur den Verkehrsablauf ausgestatteter und nicht ausgestatteter Fahrzeuge sondern bietet auch die Möglichkeit, die Kommunikation zwischen Infrastruktur und Fahrzeugen über eine Simulatorenkopplung integriert nachzubilden. Die Durchführung erfolgt mit dem mikroskopischen Verkehrsflusssimulator AIMSUN NG. Diese Software bietet mit dem AIMSUN API-Modul eine definierte, offene Schnittstelle, mittels der die Modellierung der Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur sowie die Implementierung des neuen Verfahrens zur LSA-Steuerung komfortabel integriert werden können

Mit den aus den Felduntersuchungen gewonnenen Daten zum Verhalten der Kommunikation und zum Fahrtablauf kann die Simulation kalibriert werden. Mit Hilfe der Simulation lassen sich so volkswirtschaftliche und ökonomische Nutzen des kooperativen Fahrens im Stadtverkehr ermitteln.

Bewertungsverfahren

Die abschließende Bewertung des umgesetzten Systems soll den Projektbeteiligten wie auch Interesseninhabern (Benutzer, Betreiber, Betroffene) leicht verständlich und effizient Informationen über den Projekterfolg bereitstellen. Die Bewertung im Projekt KOLINE orientiert sich an den entsprechenden FGSV-Hinweisen [FGSV, 2010] und basiert größtenteils auf den Ergebnissen des Virtuellen Testfeldes. Zunächst wurden vier Zielfelder formuliert, die durch den Einsatz von KOLINE beeinflusst werden sollen:

1. betriebliche Verkehrssicherheit (synonym: *Safety, Driving Performance*)
2. Qualität und Güte des Verkehrsablaufs (*Mobility, Productivity, System Performance*)
3. Umfeldverträglichkeit (*Environment*)
4. Wirtschaftlichkeit (*Energy, Efficiency*)

Die Betrachtung von Sicherheitsaspekten (*Security*) fehlt, da diese durch das angewendete Erhebungsverfahren einer verkehrlichen Simulation nicht oder nur schwer zu erfassen sind.

Die Bewertung der definierten Kriterien erfolgt in mehreren zu durchlaufenden Phasen und Schritten. Im ersten Schritt wurden verschiedene Methoden der Bewertung auf ihre Eignung untersucht und mehrere davon ausgewählt, da eine einheitliche Methode im Bereich der Verkehrstelematik derzeit noch nicht besteht. In vergleichbaren Projekten beschränkt man sich z.T. auf die deskriptive Form für einige wenige Kriterien, führt Nutzwertanalysen unter Einbeziehung wesentlicher Indikatoren oder umfangreicher Kosten-Nutzen-Analysen durch.

Die vorgenannten Methoden wiederum bedürfen konkreter Ausführungsanweisungen zu ihrer praktischen Anwendung. Für den vorliegenden Anwendungsfall geeignete Bewertungsverfahren sind u.a. die Empfehlungen für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (EWS) [FGSV, 1997] oder die Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs (QSV) gemäß des Handbuchs für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen HBS [FGSV, 2001].

In KOLINE sollen mehrere Ansätze verwendet werden, um sowohl eine gute Vergleichbarkeit mit derzeitigen und zukünftigen Verkehrstelematik-Projekten herzustellen als auch mehrere Bewertungsverfahren innerhalb des Projektes vergleichen und beurteilen zu können.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Vorgestellt wurde das Projekt KOLINE, in dem erstmalig ein sich gegenseitig optimierendes System von Assistenzsystem und LSA-Steuerung entwickelt wird. Durch einen bidirektionalen Datenaustausch zwischen Fahrzeug und LSA stehen beiden Seiten bisher nicht verfügbare Informationen hoher Güte zur Verfügung. Diese werden fahrzeugseitig zur Optimierung der Annäherung an den signalisierten Knotenpunkt und auf Seiten der Infrastruktur für eine verbesserte Verkehrszustandsanalyse sowie die Bestimmung einer dem aktuellen Verkehrszustand angepassten LSA-Steuerung genutzt.

Dargestellt wurden die Komponenten und angewendeten Verfahren des Systems. Ergebnisse erster Umsetzungen der isolierten Systemteile zeigten bereits die Optimierungspotentiale im Hinblick auf das Projektziel eines verbesserten Verkehrsflusses an signalisierten Knotenpunkten. Der Fokus der weiteren Arbeiten wird nun in der Implementierung hin zum Gesamtsystem liegen, so dass Feldversuche im geschützten Bereich und anschließend im öffentlichen Straßenraum möglich werden. In der Anwendung und Evaluierung des Systems auf der Straße sehen die Projektpartner einen entscheidenden Schritt, um den Nachweis der Funktionsfähigkeit und der Effizienz eines kooperativen Systems im Hinblick auf einzelne ausgestattete wie

auch nicht ausgestattete Fahrzeug aber auch das Umfeld zu erbringen. Die Kompatibilität zu den Entwicklungen des Projektes sim^{TD} ermöglicht dabei eine Übertragbarkeit der in KOLINE entwickelten Komponenten. Durch den so ermöglichten breiten Einsatz im realen Straßenverkehr ist KOLINE in der Lage, die Potentiale des Systems in vollem Umfang zu demonstrieren und einen entscheidenden Beitrag zur Reduzierung negativer Umweltwirkungen des innerstädtischen Kraftfahrzeugverkehrs zu leisten.

Literatur

DLR, 2010: DLR (Hrsg.): AIM –Anwendungsplattform Intelligente Mobilität Braunschweig, Informationsbroschüre zum Projekt http://www.dlr.de/fs/Portaldata/16/Resources/dokumente/service/DLR-TS_AnwendungsplattformIntelligenteMobilitaet.pdf, Abruf 15.11.2010.

FGSV, 1997: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Straßen (EWS), FGSV Verlag GmbH, Köln, 1997.

FGSV, 2001: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS), FGSV Verlag GmbH, Köln, 2001.

FGSV, 2010: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Hinweise zu Einsatzbereichen von Verfahren zur Entscheidungsfindung in der Verkehrsplanung, Reihe W1, Heft 153, FGSV Verlag GmbH, Köln, 2010.

Friedrich, 2005: Friedrich, B.; Almasri, E.; Modellbasierte Optimierung der Versatzzzeiten mit dem Cell Transmission Model, in Straßenverkehrstechnik Nr. 4, 49. Jahrgang Juli 2005. Kirschbaum Verlag, Bonn, 2005.

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

Mück, 2002: Mück, J.; Schätzverfahren für den Verkehrszustand an Lichtsignalanlagen unter Verwendung halteliniennaher Detektoren. in HEUREKA '02, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2002.

Pohlmann, 2010: Pohlmann, T.; New Approaches for Online Control of Urban Traffic Signal Systems, Dissertation an der Fakultät für Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Technischen Universität Braunschweig, 2010.

Saust, 2010: Saust, F.; Wille, J.; Bley, O.; Kutzner, R.; Friedrich, B.; Maurer, M.; Exploitability of vehicle related sensor data in cooperative systems., in IEEE Proceedings of the International Conference on Intelligent Transportation Systems, 2010.

sim^{TD}, 2009: Sichere Intelligente Mobilität – Testfeld Deutschland (Hrsg.); Deliverable D21.4, Spezifikation der Kommunikationsprotokolle, Version 1.0; 29.09.2009.

TU, 2010: Technische Universität Braunschweig, Pressemitteilung vom 8.10.2010, <http://www.tu-braunschweig.de/presse/medien/presseinformationen?year=2010&pinr=133>

UBA, 2010: Umweltbundesamt (Hrsg.): Handbuch Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr, 2010

Wille, 2010: Wille, J.; Saust, F.; Maurer, M.; Nothdurft, T.; Hecker, P.: Projekthaus Stadtpilot - Autonomes Fahren auf dem Braunschweiger Stadtring 26. VDI/VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und Integrierte Sicherheit, 2010.

Wolf, 2010: Wolf, F.; Libbe, S. : Wireless Co-operation – Enhanced Traffic Light Management Systems, The second IFAC Symposium on Telematics Applications, 5-8 October 2010, Timisoara, Romania, Proceedings, 2010