

VITAL - Verkehrsabhängig intelligente Steuerung von Lichtsignalanlagen

(englisch: VITAL - Vehicle-Actuated Intelligent Traffic Signal Control)

Dr.-Ing. Robert Oertel*, Dr. rer. nat. Jakob Erdmann, Dipl.-Ing. Robert Markowski, Willi Schmidt, Dipl.-Ing. (FH) Jan Trumpold und Prof. Dr. rer. nat. Peter Wagner

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Verkehrssystemtechnik
Rutherfordstr. 2, D-12489 Berlin

Abstract

Im Rahmen des Forschungsprojektes VITAL wurden zwei neuartige Steuerungsverfahren für Lichtsignalanlagen (LSA), die Informationen aus der Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation (C2I) nutzen können, erstmalig an zwei Testknoten in Halle (Saale) und Braunschweig praktisch umgesetzt und validiert. Die beiden VITAL-Steuerungsverfahren (verlustzeitbasiert und kooperativ) wurden vorab mit einer Verkehrsflusssimulation bewertet und im DLR-eigenen LSA-Labor für die Integration im Feld vorbereitet. Anschließend wurden an den Knotenpunkten die technischen Voraussetzungen für die praktische Erprobung geschaffen. Im Rahmen von mehrwöchigen Testläufen und einem Langzeittest wurden die neuartigen VITAL-Verfahren dann zur Steuerung aktiviert. Die dabei erhobenen Messdaten zeigen, dass die beiden Verfahren einen positiven Einfluss auf den Verkehrsablauf haben können, oder zumindest nicht schlechter als die derzeit dort existierenden, sehr gut funktionierenden, verkehrsabhängigen Steuerungen abschneiden. Aufgrund der positiven Ergebnisse werden die herstellerunabhängigen VITAL-Verfahren zukünftig an Knotenpunkten weiterer Kommunen auf nationaler und internationaler Ebene zum Einsatz kommen.

The aim of the research project VITAL was to implement and to validate two novel traffic signal control approaches for the first time in the field. The two new approaches are the delay-based control and the cooperative control, which depend on vehicle-to-infrastructure (C2I) communication data. Two test intersections in the German cities of Halle (Saale) and Braunschweig were set-up and equipped to meet the technical requirements for the field test. Before applying the novel controls at the intersections, they were benchmarked in simulation studies and prepared in the traffic signal laboratory of DLR for implementation. During several weeks of test runs and a long-term test, the novel VITAL methods were activated for signal control. The data collected show that the two VITAL methods can have a positive influence on the traffic flow, or perform at least not worse than the existing, very well working, vehicle-actuated controls. Due to these positive results, the manufacturer-independent VITAL controls will in future be applied at further intersections of municipalities in Germany and worldwide.

1 Einführung

Verfahren zur Steuerung von Lichtsignalanlagen (LSA) haben einen wichtigen Einfluss auf die Qualität, die Sicherheit und die Umweltverträglichkeit des Verkehrsablaufs innerhalb eines Straßennetzwerks. Mit Hinblick auf eine Optimierung dieser und ähnlicher Parameter kommt heute eine Vielzahl verschiedener Steuerungsansätze zur Anwendung, die sich in Aufbau, Komplexität und Anwendungsbereich voneinander unterscheiden. Neue Technologien im Bereich der Verkehrsdatenerfassung eröffnen in diesem Zusammenhang weitere Möglichkeiten für neuartige LSA-Steuerungsansätze. Gerade kooperative Systeme und speziell die Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation (C2I) [1] bieten hier ein großes Potential, da Fahrzeuge im direkten, bidirektionalen Informationsaustausch mit den Anlagen stehen. Darüber können Trajektorien und Kenngrößen wie z.B. individuelle Reisezeiten, Verlustzeiten oder auch empfohlene Annäherungsgeschwindigkeiten übertragen werden. Die Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation (C2I) war dabei bisher vor allem Gegenstand der Forschung, findet aktuell aber nun schrittweise auch Eingang in die Praxis. Beleg dafür sind z.B. erste Leitfäden zur Einrichtung kooperativer Systeme auf öffentlicher Seite [2], neu am Markt verfügbare Roadside Units (RSU) zur Herstellung der Kommunikationsfähigkeit von Lichtsignalanlagen und zeitnah folgende, kommunikative Serienfahrzeuge.

Vor dem Hintergrund dieses neuen Standes der Forschung und Technik, ergibt sich nun die Frage, wie LSA-Steuerungsverfahren zukünftig ausgestaltet sein müssen, um die Potentiale aus der Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation (C2I) im Sinne der Verkehrssteuerung nutzbar zu machen. Als eine mögliche Antwort auf diese Frage, wurden zwei neuartige LSA-Steuerungsverfahren entwickelt, die grundsätzlich aus der C2I-Kommunikation ableitbare Kenngrößen als Eingangsgrößen für ihre Steuerungsentscheidungen nutzen. Diese neuartigen LSA-Steuerungsverfahren und ihre Funktionsweisen sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden, bevor deren schrittweise Umsetzung und praktische Erprobung im Feld, sowie die daraus ableitbaren Ergebnisse beschrieben werden.

2 VITAL-Steuerungsverfahren

Bei den zwei neuartigen LSA-Steuerungsverfahren handelt es sich um das sog. verlustzeitbasierte Verfahren und um das sog. kooperative Verfahren. Beide Verfahren wurden mit dem vorausblickenden Ziel konzipiert, keine Daten aus der traditionellen ortsfesten Erfassung zu verwenden, sondern stattdessen Informationen aus der beschriebenen C2I-Kommunikation zwischen Fahrzeug und LSA zur Steuerung zu nutzen. Allerdings ist auch die Nutzung konventioneller, ortsfester Erfassungstechnik möglich, wie an späterer Stelle noch gezeigt werden wird, um eine heutige Nutzung ohne noch nicht vorhandene C2I-Kommunikation zu ermöglichen.

2.1 Verlustzeitbasiertes Steuerungsverfahren

Das verlustzeitbasierte Verfahren verfolgt die prinzipielle Idee [3], [4] aktuell gemessene und übertragene Verlustzeiten herannahender Fahrzeuge direkt für die Anpassung der Freigabezeiten an einem Knotenpunkt zu nutzen. Die Verlustzeit eines Fahrzeugs ist dabei dessen zeitlicher Mehraufwand zum Passieren des Knotenpunktes gegenüber einer behinderungsfreien Durchfahrt. Das heißt, sobald ein Fahrzeug in einer Zufahrt verzögern muss und sich unterhalb einer definierten Grenzgeschwindigkeit bewegt, was z.B. ein ortstypischer Wert

unterhalb der zulässigen Höchstgeschwindigkeit sein kann, sammelt es automatisch Verlustzeit an. Dies wird in der Regel durch die LSA selbst oder durch die Verkehrslage bedingt und führt zu entsprechenden Verzögerungs-, Warte- und Beschleunigungsvorgängen, die sich in der angesammelten Verlustzeit eines Fahrzeugs widerspiegeln. Vom Prinzip her greift die Steuerung diese Information nun als Eingangsgröße von den Fahrzeugen auf und verlängert eine laufende Freigabephase unter Beachtung einer minimal und maximal zulässigen Phasendauer regelbasiert solange, bis alle Fahrzeuge mit angesammelter Verlustzeit in der zugehörigen Zufahrt bzw. Phase abgeflossen sind. Dann erfolgt ein Phasenwechsel und das Prinzip läuft in der nächsten Zufahrt bzw. Phase eines Umlaufs ab. Eine genauere Beschreibung der verlustzeitbasierten Steuerung findet sich in [5], [6], [7], [8].

2.2 Kooperatives Steuerungsverfahren

Beim kooperativen Verfahren wird eine verkehrsabhängige, regelbasierte Steuerung mit der GLOSA-Funktionalität [9] (Green Light Optimal Speed Advisory) verknüpft [10]. Das heißt, dieses Verfahren kann verkehrsabhängig agieren und gleichzeitig verlässliche Annäherungsempfehlungen an die herannahenden Fahrzeuge versenden. Dafür werden die heranahenden Fahrzeuge frühzeitig in den einzelnen Zufahrten mit ihren Positionen und Geschwindigkeiten erfasst und deren weitere Fahrtverläufe prognostiziert. Dies kann auf Grundlage eines Modells oder einer Simulation geschehen. Anhand dieser prognostizierten Verläufe lassen sich dann die Fahrzeugankünfte an den Haltelinien der einzelnen Zufahrten vorhersagen und die Freigabezeiten entsprechend verkehrsabhängig anpassen. Dies passiert ebenfalls unter Beachtung minimal und maximal zulässiger Freigabedauern. Den Schritt der Freigabezeitanpassung nimmt dabei ein auf dynamischer Programmierung basierender Optimierungsalgorithmus vor. Dieser verfolgt das Ziel, die Summe der Wartezeiten aller Fahrzeuge am Knotenpunkt zu minimieren. Prinzipiell kann das Verfahren den herannahenden Fahrzeugen das so für sie errechnete, optimale Geschwindigkeitsprofil übermitteln oder alternativ die entsprechend prognostizierten Freigabe- und Sperrzeiten. So können die Fahrzeuge ihre Fahrtverläufe entsprechend dynamisch anpassen. Die Optimierung findet kontinuierlich statt und es kommt zur fortlaufenden Iteration zwischen Prognose und Beeinflussung und damit zur benannten Verknüpfung der Verkehrsabhängigkeit mit der gleichzeitigen GLOSA-Funktionalität. Details zum kooperativen Verfahren können [11] entnommen werden.

3 Umsetzung im Feld

3.1 Versuchsknotenpunkte und Detektionsgrundlage

Im Rahmen des Forschungsprojektes VITAL (Verkehrsabhängig intelligente Steuerung von Lichtsignalanlagen) [12] sollten die beiden neuartigen Verfahren in die Praxis überführt und prototypisch validiert werden. Dafür mussten zunächst geeignete Testknotenpunkte gefunden werden. Wichtigste Voraussetzung war dabei, dass die zuständige Kommune die Bereitschaft hatte, einen Knotenpunkt für Forschungszwecke bereitzustellen. Der Knotenpunkt im Bestand sollte dabei verkehrsabhängig gesteuert werden, falls möglich mit einer flexiblen Umlaufzeit und nicht in eine Koordinierung eingebunden sein. Diese letzte Randbedingung ist durchaus untypisch für innerstädtische Knotenpunkte, war aber wichtig, da die beiden VITAL-Verfahren in der ersten Ausbaustufe zunächst nur für den Einsatz an einem Einzelknoten konzipiert waren und möglichst frei agieren sollten. Die Verkehrsstärken sollten nach

Möglichkeit schwanken, um das Verhalten bei Lastwechseln und in verschiedenen Verkehrssituationen beobachten zu können. Bestehende ÖPNV-Bevorrechtigungen sollten unangetastet bleiben. Fußgänger und Radfahrer sollten zwar berücksichtigt werden, aber keinen aktiven Einfluss auf die Steuerung nehmen können. Zwei Knotenpunkte, die diese Voraussetzungen erfüllen, wurden dafür in Halle (Saale) und Braunschweig ausgewählt. Es handelt sich dabei um die Knoten Dölauer Straße / Brandbergweg bzw. den Tostmannplatz, wie diese in Bild 1 dargestellt sind.



Bild 1: VITAL-Versuchsknotenpunkte in Halle (Saale) - Dölauer Straße / Brandbergweg (links) und Braunschweig - Tostmannplatz (rechts).

Beide Knotenpunkte unterscheiden sich in ihrer Geometrie, der technischen Ausstattung und den verkehrlichen Verhältnissen. Der Versuchsknoten in Halle (Saale) verfügt über drei Arme mit jeweils einer zu- und einer abführenden Fahrspur, ergänzt um einzelne Abbiegespuren. Die bestehende LSA-Steuerung erfasst über Induktionsschleifen und Infrarot-Sensoren die Belegungsdauern und Zeitlücken für die verkehrsabhängige Anforderung und Bemessung. Eine Busbevorrechtigung ist vorhanden. Der zweite Versuchsknotenpunkt in Braunschweig ist mit vier Armen komplexer. Auf der durchgehenden Hauptfahrbahn sind zwei Fahrspuren je Fahrtrichtung und zusätzliche Abbiegespuren vorhanden. Auch hier erfolgt die verkehrsabhängige Anforderung und Bemessung über eine Vielzahl von Induktionsschleifen in den Zufahrten. Eine Buslinie befährt den Knotenpunkt zwar, diese ist aber nicht bevorrechtigt.

Um die beiden VITAL-Steuerungsverfahren nun testen zu können, mussten zunächst die systemtechnischen Voraussetzungen geschaffen werden [13]. Beide Knotenpunkte verfügen über ein LSA-Steuergerät Siemens C940, welches um zusätzliche Komponenten erweitert wurde. Die größte Herausforderung stellte dabei die Erfassung der zur Steuerung benötigten Kenngrößen wie Verlustzeiten, Positionen und Geschwindigkeiten der Fahrzeuge dar. Wie bereits beschrieben, wurden beide Verfahren für den Einsatz auf Basis der Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation (C2I) entwickelt. Damit sollte auch demonstriert werden, dass die Verkehrssteuerung nicht nur mit Fahrzeuganzahlen (Verkehrsstärken) und anderen klassischen Kenngrößen (Zeitlücken, Belegungen) funktionieren kann. Die für die Verfahren erforderliche Mindestausstattungsrate an kommunikativen Fahrzeugen von etwa 20% [3], [4] ist aktuell noch nicht verfügbar, weshalb die entsprechenden Ersatzdaten mit Hilfe von konventioneller Sensorik beschafft werden mussten. Das machte den realen Aufbau für die Feldtests der beiden neuartigen Verfahren deutlich komplizierter als eigentlich notwendig und stellt eine Übergangsvariante für den Ausgleich der fehlenden C2I-Daten dar.

Als Übergangsvariante [8] wurden daher in jeder zuführenden Fahrspur paarweise zwei voneinander abgesetzte Messquerschnitte zur Fahrzeugerkennung installiert (Bild 2). Diese bil-

den zusammen einen dazwischenliegenden Messabschnitt, in dem die zur Steuerung erforderlichen Verlustzeitinformationen und Ankunftszeitpunkte der herannahenden Fahrzeuge bestimmt werden. Grundsätzlich wird damit jedes Fahrzeug beim Einfahren und Verlassen des Messabschnitts erfasst, benachbarte Fahrspuren bilden einen gemeinsamen Messabschnitt, eine Fahrzeugwiedererkennung ist nicht notwendig. Der erste Messquerschnitt sollte dabei möglichst weit entfernt von der Haltelinie liegen, der zweite Messquerschnitt unmittelbar hinter der Haltelinie. Eine Kommunikation von der LSA hin zu den Fahrzeugen für Geschwindigkeitsempfehlungen ist über diesen Kanal naturgemäß nicht möglich. Da die vorhandenen Induktionsschleifen an den Versuchsknotenpunkten diese erforderliche Kombination nicht abdeckten, wurden zusätzliche, funkbasierte Magnetfeldsensoren in die Fahrbahnoberflächen installiert. Zusätzlich wurde der Versuchsknotenpunkt in Braunschweig bereits mit einer Roadside Unit (RSU) zur Kommunikation mit Fahrzeugen ausgerüstet, auch wenn diese im Feldtest noch nicht zur Anwendung kam.

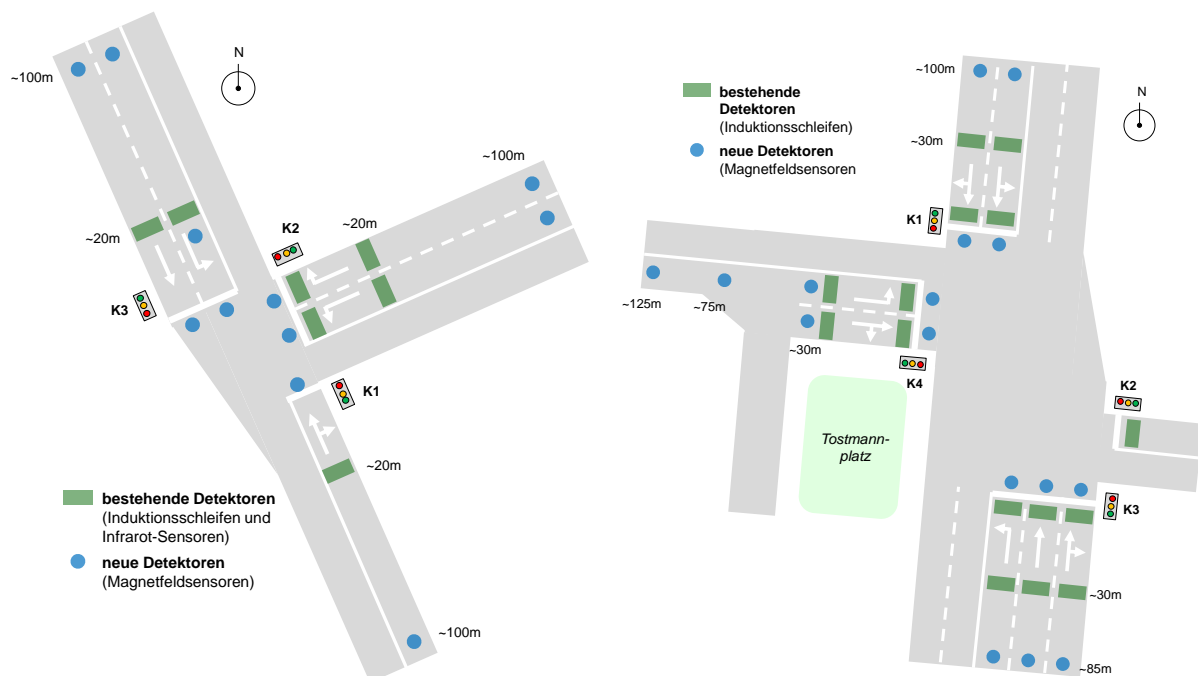


Bild 2: Detektoranordnung an den beiden VITAL-Versuchsknotenpunkten in Halle (Saale) (links) und Braunschweig (rechts).

3.2 Steuerungsimplementierung

Im nächsten Schritt mussten die beiden VITAL-Verfahren für die Einspielung in die LSA-Steuergeräte an den Versuchsknotenpunkten vorbereitet werden. Für die Implementierung mussten diese zunächst an die örtlichen Gegebenheiten angepasst, in eine Steuerungslogik umgesetzt und in eine einspielbare Versorgungsdatei überführt werden. Grundlage dafür waren die bestehenden verkehrsabhängigen Steuerungen. Vom Ansatz her wurden diese komplett beibehalten, nur das Abbruchkriterium für eine laufende Phase wurde durch die VITAL-Verfahren ersetzt. Das heißt Größen wie Zwischenzeiten, Umlaufzeiten, Phasenfolgen, minimale und maximale Signalzeiten, Parameter zur ÖPNV-Bevorrechtigung, etc. wurden nicht angetastet. Einzig die Dehnung einer Phase erfolgte nun anstatt nach dem Zeitlückenkriterium (aktuell gemessener Wert ist größer als maximal zulässiger Wert) über neue

Abbruchkriterien. Im Falle des verlustzeitbasierten Verfahrens ist dies das Kriterium der Verlustzeitfreiheit, im Falle des kooperativen Verfahrens sind dies die prognostizierten, wartezeitoptimalen Fahrzeugankünfte.

Für die Umsetzung des verlustzeitbasierten Verfahrens nach diesem Ansatz, waren die bestehenden Steuerungslogiken der beiden Knotenpunkte an verschiedenen Stellen zu modifizieren und durch mehrere Funktionsmodule zu erweitern. Die Module enthalten dabei die Funktionalitäten des verlustzeitbasierten Verfahrens und wurden einfach in den Bestandslogiken ergänzt. Diese Herangehensweise sorgte für eine hohe Transparenz und Wiederverwendbarkeit der Module, auch auf andere Bestandssteuerungen. Das verlustzeitbasierte Verfahren ist grundsätzlich auf jedem LSA-Steuergerät herstellerunabhängig und direkt umsetzbar, da es mit den Funktionalitäten aus den Standardbibliotheken der gängigen Verkehrsingenieurarbeitsplätze abgebildet ist.

Für die Umsetzung des kooperativen Verfahrens wurde eine ähnliche Herangehensweise gewählt. Da bestimmte Komponenten dieses Verfahrens allerdings bisher noch nicht auf einem gängigen LSA-Steuergerät ausführbar sind, wurden diese auf einen externen Beckhoff Industrie-Mini-PC (Bild 3, links) ausgelagert. Bei diesen Komponenten handelt es sich um eine SUMO-Simulation [14] im Hintergrund sowie den Optimierungsalgorithmus. Der Simulation kommt dabei die Aufgabe zu, aus den Detektionen die weiteren Fahrtverläufe auf dem Weg zu den Haltelinien zu prognostizieren. Dies ist wiederum Grundlage für den Optimierungsalgorithmus und die daraus resultierenden Schaltbefehle. Die Bestandssteuerung musste dann dahingehend modifiziert werden, dass sie in die Lage versetzt wurde, über digitale Ein- und Ausgänge des LSA-Steuergeräts Fahrzeugdetektionen, Signalbilder und Schaltbefehle mit dem Industrie-Mini-PC austauschen zu können. Der Impuls für den Phasenabbruch kommt dabei vom Industrie-Mini-PC und dem dort ausgeführten kooperativen Verfahren. Die Logik auf dem LSA-Steuergerät überwacht die Einhaltung der Rahmenbedingungen (Zwischenzeiten, minimale und maximale Signalzeiten, etc.).



Bild 3: Industrie-Mini-PC am VITAL-Versuchsknotenpunkt in Halle (Saale) (links) und DLR-eigenes LSA-Labor am Standort Berlin-Adlershof (rechts).

Bevor diese Modifikationen an den Versuchsknotenpunkten im Feld durchgeführt wurden, haben prototypische Umsetzungen im DLR-eigenen LSA-Labor (Bild 3, rechts) stattgefunden. Dieses ist mit realen LSA-Steuergeräten und gängigen Verkehrsingenieurarbeitsplätzen verschiedener Hersteller ausgestattet. Daneben wurden hier vor der Versorgung der LSA mit den VITAL-Verfahren im Feld, verschiedene Simulationsstudien [15][14], [16] durchgeführt,

um verkehrliche Effekte abschätzen und Steuerungsparameter nachparametrieren zu können. Die beiden VITAL-Verfahren wurden dann bei der Versorgung im Feld mit zusätzlichen Signalzeitenplänen in den LSA-Steuergeräten verknüpft. Diese Signalzeitenpläne konnten vom Verkehrsrechner der Städte samt VITAL-Logiken aktiviert und deaktiviert werden. So wäre es möglich gewesen, über den Fernzugriff wieder in die jeweilige Bestandssteuerung zu wechseln, wäre es zu Problemen mit den neuen VITAL-Verfahren im Praxistest gekommen.

4 Praxistestläufe

4.1 Vergleichstests

Nachdem die beiden Versuchsknotenpunkte technisch vorbereitet und mit den VITAL-Verfahren versorgt waren, konnte der Validierungsbetrieb im Feld starten. Mit Hinblick auf möglichst vergleichbare Verkehrsbelastungen an den Knotenpunkten für alle Verfahren während der Testläufe, wurden geeignete Testzeiträume festgelegt. Jedes der beiden VITAL-Verfahren sollte dabei mindestens eine Woche zur Anwendung kommen. Der Programmwechsel zwischen den Verfahren wurde dabei in der Wochenschaltautomatik hinterlegt.

Innerhalb der Testzeiträume wurden dann Mitschnitte zu den VITAL-Verfahren und zu den Bestandssteuerungen durch die Verkehrsrechner der beiden Städte erstellt. Diese Mitschnitte enthalten Parameter wie Verkehrsstärken, Signalzeiten, Detektorbelegungen und -zählwerte, Phasendauern und Umlaufzeiten, ÖPNV-Anforderungen, etc. Zudem wurde über zuvor definierte Anwenderparameter eine Vielzahl weiterer, verfahrensspezifischer Kenngrößen mitgeschrieben. Für die Erfassung der Verlustzeiten der Fahrzeuge wurde dabei die ohnehin schon für die VITAL-Verfahren notwendigen, ortsfesten Erfassungseinheiten und Messabschnitte genutzt. Das heißt, das verlustzeitbasierte Verfahren ermittelt für seine Steuerungsentscheidung bereits die Verlustzeiten in den Zufahrten über die verbauten Detektoren. Diese Information, die nicht nur während der Aktivierung des verlustzeitbasierten Verfahrens, sondern immer im Hintergrund auch für die anderen Verfahren ermittelt wird, wurde während der Testzeiträume aufgezeichnet und für die Bewertung genutzt. Daneben wurden Verkehrsbeobachtungen und Zählung vor Ort an den beiden Versuchsknotenpunkten in Halle (Saale) und Braunschweig vorgenommen.

Nach dem Abschluss der Testläufe fand dann die Auswertung und Evaluierung der beiden VITAL-Verfahren anhand der erhobenen Aufzeichnungen [17], [18] statt. Es wurden hierbei die in den Mitschnitten erhobenen Kenngrößen analysiert und die Ergebnisse der verlustzeitbasierten Steuerung sowie der kooperativen Steuerung denen der bereits sehr gut funktionierenden Bestandssteuerungen gegenübergestellt. Diese Ergebnisse werden im Folgenden dargestellt, wobei diese teilweise auf einzelne Signalgruppen heruntergebrochen werden, deren Zuordnung nochmals dem in Kapitel 3.1 vorangegangenen Bild 2 entnommen werden können.

Als Bewertungsindikator wird die mittlere Verlustzeit je Fahrzeug genutzt. Die mittlere Anzahl der Halte wird an dieser Stelle nicht betrachtet, da die VITAL-Verfahren in ihrer ersten Ausbaustufe nur für den Einsatz am Einzelknoten konzipiert waren, wie bereits erwähnt. Die mittlere Verlustzeit wurde aus den Mitschnitten bestimmt und über die tatsächliche Anwendungsdauer eines Verfahrens und über die Anzahl der in dieser Zeit passierten Fahrzeuge

normiert. Somit konnte sichergestellt werden, dass die ermittelten Werte für die einzelnen Verfahren sinnvoll miteinander vergleichbar sind. Das Ergebnis dieses Vergleichs zwischen der Bestandssteuerung als Referenz, der kooperativen Steuerung und der verlustzeitbasierten Steuerung ist für Halle (Saale) in den KW 36-39 des Jahres 2016 in Bild 4 dargestellt. Bei der Betrachtung der Ergebnisse ist erkennbar, dass beide VITAL-Verfahren in diesem Testlauf, bezogen auf den Gesamtknoten, reduzierte Verlustzeiten erzielen konnten. Bei genauerer Betrachtung der einzelnen Signalgruppen wird dabei deutlich, dass dieser Effekte fast ausschließlich an der Signalgruppe K1 erzielt wurde. In dieser Zufahrt waren in den Spitzenstunden regelmäßig längere Warteschlangen vorhanden, die die VITAL-Verfahren trotz gleicher Steuerungsrahmenparameter wie bei der Bestandssteuerung (z.B. maximal zulässige Freigabezeit), offenbar in anderer Weise bedienen, wie die Beobachtungen vor Ort bestätigt haben.

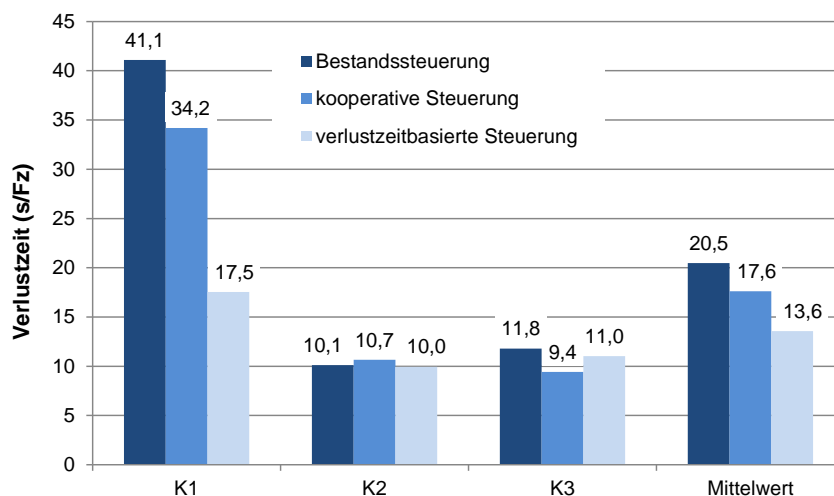


Bild 4: Halle (Saale) - Vergleich der mittleren Verlustzeiten je Fahrzeug der KW36-39 in 2016 unterschieden nach Signalgruppen K1-3 und Mittelwert.

Da diese Beobachtungen bei den mittleren Verlustzeiten jeweils sämtliche Nachfragesituationen über den Betrachtungszeitraum von mindestens einer Woche beinhalten, wurde noch eine weitere Detaillierung auf Grundlage von verschiedenen Nachfrageszenarien vorgenommen. Damit sollte untersucht werden, wie sich die VITAL-Verfahren in unterschiedlichen Nachfragesituationen verhalten. Hierfür wurden in Abhängigkeit der Spitzenstunde der Referenzsteuerung ein Schwachlast-, ein Mittellast- und ein Starklastszenario gebildet:

- Schwachlast: 0-60% der Verkehrsbelastung der Spitzenstunde
- Mittellast: 60-80% der Verkehrsbelastung der Spitzenstunde
- Starklast: 80-100% der Verkehrsbelastung der Spitzenstunde

Alle zuvor ermittelten, stündlichen Verkehrsstärkescheiben aller drei Steuerungen, wurden dann einem der drei Szenarien zugeordnet. Über diese Zuordnung der Verkehrsstärkescheiben erfolgte dann letztendlich auch die Zuordnung der zugehörigen mittleren Verlustzeiten je Fahrzeug.

Die Ergebnisse dieser Unterteilung sind in Bild 5 dargestellt. Ersichtlich wird, dass die beiden VITAL-Verfahren im Falle der schwachen Verkehrsnachfrage zunächst nur geringe Unterschiede gegenüber der Bestandssteuerung aufweisen. Aufgrund der Einhaltung der für alle drei Steuerungen gleichen Mindestfreigabezeiten, besteht hier offenbar nur wenig Potential zur Umverteilung von Freigabezeitanteilen. Mit steigender Verkehrsnachfrage werden die Unterschiede zwischen den Steuerungen stetig größer, um bei einer starken Verkehrsnachfrage ihr Maximum zu erreichen.

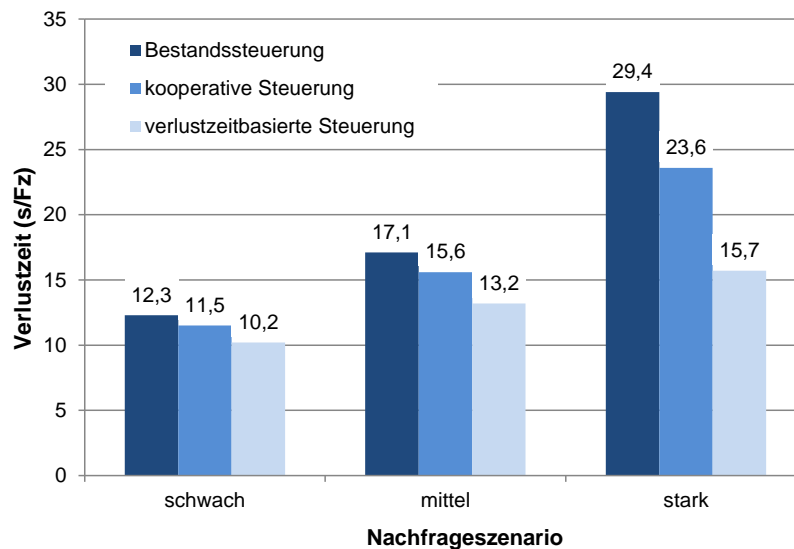


Bild 5: Halle (Saale) - Vergleich der mittleren Verlustzeiten je Fahrzeug der KW36-39 in 2016 unterschieden nach Nachfrageszenario.

Abschließend soll noch ein Blick auf die geschalteten Umlaufzeiten geworfen werden. Diese stehen im unmittelbaren Zusammenhang mit den ermittelten Verlustzeiten und bedingen diese durch die letztendlich geschalteten Freigabezeiten maßgeblich. In Bild 6 sind Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen für die gemessenen Umlaufzeiten der drei Steuerungen abgetragen. Dabei wird ersichtlich, dass die Bestandssteuerung und die kooperative Steuerung einen sehr ähnlichen Verlauf aufweisen, wobei die Bestandssteuerung gegenüber der kooperativen Steuerung tendenziell mehr kürzere Umlaufzeiten schaltet. Dies entspricht genau dem Charakter der kooperativen Steuerung, welche Phasen eher vorausschauend und damit länger dehnt. Dieses Verhalten war ebenfalls bei den Verkehrsbeobachtungen vor Ort zu erkennen. Die verlustzeitbasierte Steuerung zeigt hingegen ein komplett anderes Schaltverhalten. Hier werden sehr viel häufiger kurze Umlaufzeiten geschaltet, was mit häufigeren Phasenwechseln einhergeht. Dieses sehr agile Schaltverhalten konnte ebenfalls vor Ort beobachtet werden. Die ÖPNV-Bevorrechtigung blieb komplett unangetastet, wie bereits beschrieben, allerdings kann sich ein häufiger Phasenwechsel in diesem Zusammenhang dahingehend auswirken, dass eine benötigte Phase zufälliger häufiger nicht bereits anliegt und erst angefordert werden muss. Mit weniger häufigen Phasenwechseln verringert sich diese Wahrscheinlichkeit naturgemäß.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Unterschiede des kooperativen Verfahrens gegenüber der Bestandssteuerung damit offenbar aus dem vorausschauenden Schaltverhalten, die Unterschiede des verlustzeitbasierten Verfahrens hingegen aus dem

schnellen Umschalten stammen. Die in der Abbildung erkennbaren, sehr kurzen oder langen Umlaufzeiten stammen dabei aus Programmwechseln sowie Ein- und Ausschaltvorgängen.

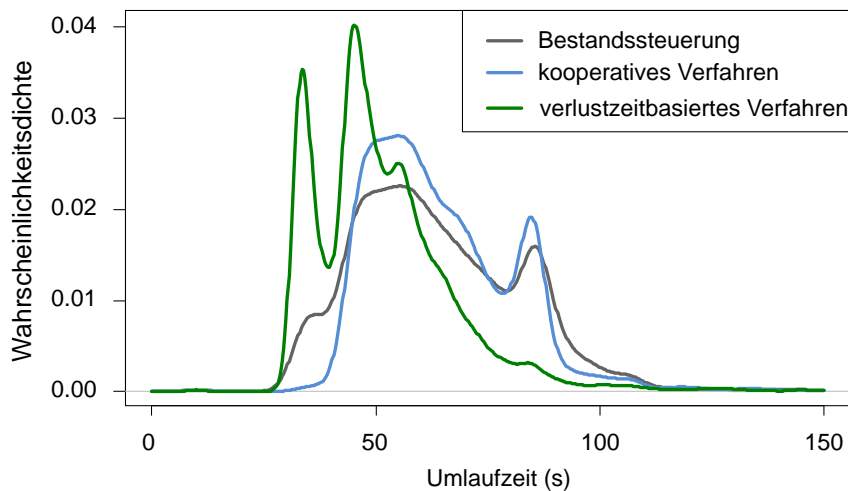


Bild 6: Halle (Saale) - Wahrscheinlichkeitsdichten der Umlaufzeiten für die drei Verfahren in den KW36-39 des Jahres 2016.

In gleicher Art und Weise wurden nun die beiden VITAL-Verfahren mit der Bestandssteuerung in Braunschweig verglichen. Das Ergebnis dieses Vergleichs ist für die KW 37-41 des Jahres 2016 in Bild 7 dargestellt. Bei der Betrachtung der Ergebnisse ist erkennbar, dass für beide VITAL-Verfahren in diesem Testlauf, bezogen auf den Gesamtknoten, ebenfalls reduzierte Verlustzeiten beobachtet werden konnten. Die genauere Betrachtung der Signalgruppen bezieht sich in diesem Fall auf K1, K3 und K4. Die Signalgruppe K2 wurde nicht weiter untersucht, da in dieser Zufahrt nur sehr wenige Fahrzeuge unterwegs sind (Zufahrt Einfamilienhaussiedlung). Der größte Unterschied gegenüber der Bestandssteuerung, der maßgeblich für den gesamten Knotenpunkt ist, war an der Signalgruppe K4 zu beobachten. Wie in Halle (Saale) auch, treten hier regelmäßig längere Warteschlangen aufgrund von Schichtwechseln in einem nahen Automobilwerk auf, die die VITAL-Verfahren offenbar anders behandeln, als dies die Bestandssteuerung tut. Dies konnte wiederum durch Beobachtungen vor Ort bestätigt werden.

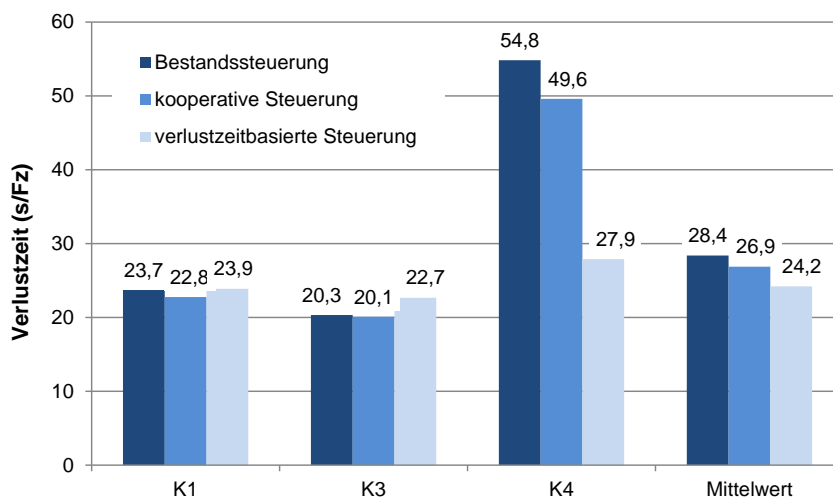


Bild 7: Braunschweig - Vergleich der mittleren Verlustzeiten je Fahrzeug der KW37-41 in 2016 unterschieden nach Signalgruppen K1, K3, K4 und Mittelwert.

Anschließend erfolgte noch der Vergleich der mittleren Verlustzeiten je Fahrzeug unterteilt nach Nachfrageszenario in Bild 8. Ähnlich wie am Testknoten in Halle (Saale) sind die Unterschiede zwischen den Steuerungen bei schwachen Verkehrsstärken am kleinsten und steigen mit zunehmender Verkehrsnachfrage stetig an.

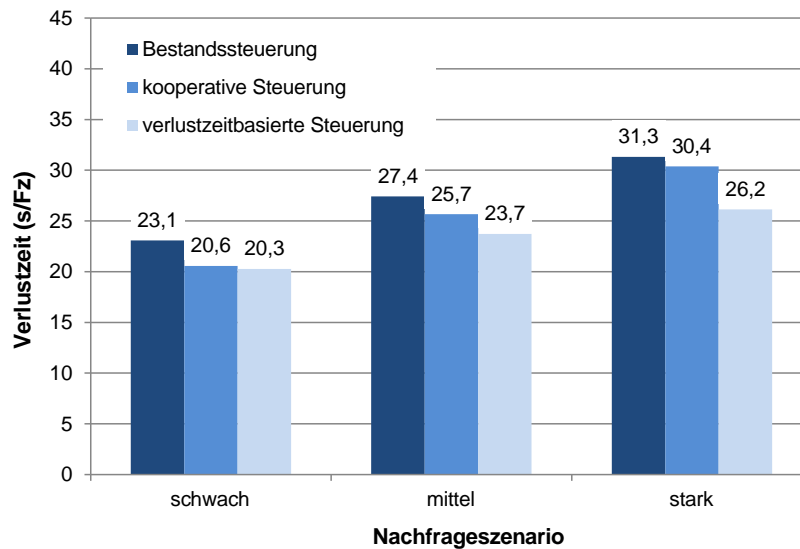


Bild 8: Braunschweig - Vergleich der mittleren Verlustzeiten je Fahrzeug der KW37-41 in 2016 unterschieden nach Nachfrageszenario.

Mit dem Abschluss der Auswertungen der Vergleichstests in Halle (Saale) und Braunschweig konnten für die neuartigen VITAL-Verfahren einige erste Beobachtungen im Praxiseinsatz gemacht werden. Offenbar haben sowohl das verlustzeitbasierte Verfahren, als auch das kooperative Verfahren ein gegenüber den Bestandssteuerungen verändertes Schaltverhalten.

4.2 Langzeittest

Aufgrund dieser ersten positiven Erfahrungen wurde am Versuchsknotenpunkt in Halle (Saale) im März 2017, nach dem offiziellen Abschluss des Projektes VITAL, ein Langzeittest gestartet. Ab diesem Zeitpunkt wurde das verlustzeitbasierte Verfahren dauerhaft zur Steuerung des Verkehrs unter Nutzung der ortsfesten Detektion aktiviert. Ziel war es das verlustzeitbasierte Verfahren über einen längeren Zeitraum zu beobachten. Die Ergebnisse dieses Dauereinsatzes sind in Bild 9 dargestellt. Bewertungsgröße ist wiederum die mittlere Verlustzeit je Fahrzeug, abgetragen über die einzelnen Kalenderwochen. Zudem ist die Gesamtverkehrsnachfrage am Knotenpunkt je Woche dargestellt. In den KW 10 und 11 des Jahres 2017 kam zunächst noch die Bestandssteuerung zum Einsatz, bevor ab der KW 12 das verlustzeitbasierte Verfahren aktiviert wurde und bis heute, mit Ausnahme der KW 1 und 2 des Jahres 2018, im Dauereinsatz läuft.

Aus den Ergebnissen ist ablesbar, dass sowohl die Bestandssteuerung, als auch das verlustzeitbasierte Verfahren im Langzeittest ähnliche mittlere Verlustzeiten wie im vorangegan-

genen, kürzeren Vergleichstest produzieren. Die dort ermittelten Ergebnisse bestätigen sich somit auch über einen längeren Betrachtungszeitraum. Die Verkehrsnachfrage hat im Betrachtungszeitraum gewissen Schwankungen unterlegen, was im Wesentlichen auf Baumaßnahmen im übergeordneten Straßennetz (Erhöhung) und Ferienzeiten (Senkung) zurückzuführen ist. Auf den beobachteten Unterschied zwischen Bestandssteuerung und verlustzeitbasiertem Verfahren hat dies jedoch keinen Einfluss, da es sich bei den ermittelten Verlustzeiten je Fahrzeug ohnehin um normierte Werte handelt, was diese unabhängig von der Verkehrsnachfrage vergleichbar macht, wie bereits beschrieben wurde.

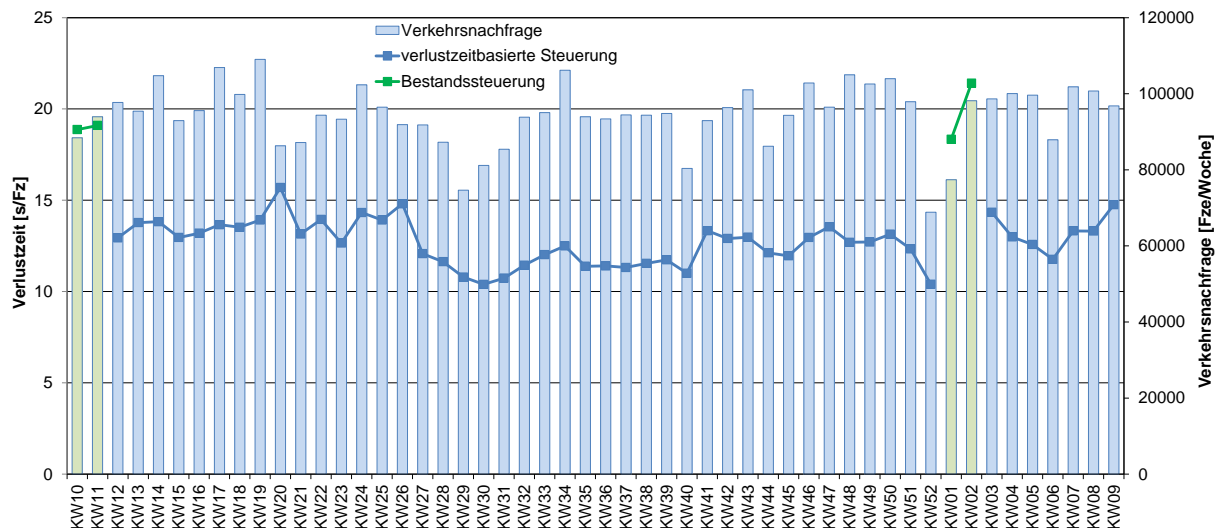


Bild 9: Halle (Saale) - Vergleich der mittleren Verlustzeiten je Fahrzeug im Langzeittest (März 2017 – Februar 2018 / KW10/2017 – KW09/2018) zwischen Bestandssteuerung und verlustzeitbasiertem Verfahren.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem verlustzeitbasierten und dem kooperativen Verfahren wurden zwei neuartige Ansätze zur LSA-Steuerung entwickelt, die grundsätzlich auf Informationen aus Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation (C2I) aufsetzen. Diese wurden bisher in umfangreichen Simulationsstudien getestet und bewertet. Das Ziel des Forschungsprojektes VITAL war es, diese beiden neuartigen Steuerungen erstmals auch praktisch im Feld umzusetzen und zu validieren. Dafür wurden zwei Knotenpunkte in den Städten Halle (Saale) und Braunschweig ausgewählt. Da eine Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation (C2I) zwischen LSA und Fahrzeugen bisher nicht ausreichend verfügbar ist, musste zur Kenngrößenerfassung eine Übergangslösung mit ortsfesten Detektoren geschaffen werden. Die beiden neuartigen LSA-Verfahren wurden dann derart in die Bestandssteuerungen integriert, dass diese vom Aufbau und von den grundsätzlichen Parametern unangetastet blieben. Einzig das Abbruchkriterium für eine laufende Freigabe wurde durch den verlustzeitbasierten bzw. den kooperativen Ansatz ersetzt. Das verlustzeitbasierte Verfahren ist dabei vollständig auf einem standardisierten LSA-Steuergerät herstellerunabhängig abbildbar, das kooperative Verfahren benötigt eine zusätzliche Recheneinheit zum Informationsaustausch mit dem LSA-Steuergerät. Nach der Versorgung der Anlagen im Feld, erfolgten dann die mehrwöchigen Testläufe unter realem Verkehr. Bei der anschließenden Auswertung von dabei aufgenommenen Messwerten

konnte für die beiden VITAL-Verfahren ein anderes Schaltverhalten gegenüber den sehr gut funktionierenden Bestandssteuerungen der Testknotenpunkte beobachtet werden. Dies drückte sich vor allem in veränderten Umlaufzeiten und mittleren Verlustzeiten je Fahrzeug aus. Offenbar können sowohl die verlustzeitbasierte Steuerung, als auch die kooperative Steuerung einen positiven, oder zumindest keinen negativen Einfluss auf den Verkehrsablauf an einem LSA-geregelten Knoten haben. Diese Beobachtungen konnten für die verlustzeitbasierte Steuerung in einem Langzeittest bestätigt werden. Aufgrund dieser positiven Ergebnisse werden die herstellerunabhängigen VITAL-Verfahren zukünftig an Knotenpunkten weiterer Kommunen auf nationaler und internationaler Ebene zum Einsatz kommen.

Von entscheidender Bedeutung für die VITAL-Verfahren ist die Detektionsgrundlage. Zwar wurde mit dem Ansatz der Verwendung von Magnetfeldsensoren eine Übergangslösung gefunden, allerdings ist diese nicht optimal. So hat sich gezeigt, dass es zu Ungenauigkeit bei der Detektion der Fahrzeuge kommen kann, wie der Abgleich mit den ebenfalls ortsfesten Induktionsschleifen gezeigt hat. Kompensiert wurden diese Differenzen durch entsprechende Korrekturmodule innerhalb der Ablauflogiken. Mit dem zukünftigen Einsatz der Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation (C2I) könnten sich derartige Ungenauigkeiten verringern, auch weit unterhalb von Ausstattungsraten einer Vollausstattung.

Da die VITAL-Verfahren bisher ausschließlich Informationen vom MIV zur Steuerung verwenden, besteht weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf bei der Integration vom ÖPNV, von Sondereinsatzfahrzeugen, von Fußgängern und von Radfahrern. Zwar können diese prinzipiell bereits jetzt in die Verfahren integriert werden, da diese nicht unterscheiden, von welchem Verkehrsteilnehmer beispielsweise Informationen zu Position, Geschwindigkeit oder Verlustzeitstatus stammen. Allerdings wäre hier eine gesonderte Behandlung von Vorteil, ganz abgesehen von den Herausforderungen bei der Detektion der Fußgänger und Radfahrer.

Ein ebenfalls wichtiger Punkt ist die Weiterentwicklung der VITAL-Verfahren hin zur Koordinierungsfähigkeit. Bisher waren diese in der ersten Ausbaustufe für den Einsatz am Einzelknoten konzipiert. Gerade im städtischen Umfeld sind allerdings viele Lichtsignalanlagen in eine Grüne Welle eingebunden. Um die VITAL-Verfahren auch hier zur Anwendung bringen zu können, wurden diese daher für den Koordinierungseinsatz konzeptionell erweitert und bereits erfolgreich in der Simulation getestet. Die Validierung der erweiterten VITAL-Verfahren im realen Verkehr erfolgt seit dem 2. Quartal 2018 im Rahmen des Nachfolgeprojektes VITAL.NET (Verkehrsabhängig intelligente Steuerung von Lichtsignalanlagen in Straßennetzen), über das an dieser Stelle zu einem späteren Zeitpunkt erneut berichtet werden soll.

Danksagung

Die Autoren möchten dem Helmholtz-Validierungsfonds (HVF) und dem Technologiemarketing des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) für die finanzielle Förderung sowie den Städten Halle (Saale) und Braunschweig und den ausführenden Unternehmen für die stets sehr kooperative Zusammenarbeit im Rahmen des Forschungsprojektes VITAL danken.

Literatur

- [1] European Telecommunications Standards Institute (ETSI): Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service, ETSI EN 302 637-2, 09/2014.
- [2] KATHS, J.; et al. (2016). Leitfaden für die Einrichtung kooperativer Systeme auf öffentlicher Seite. Abschlussdokument Projekt UR:BAN – Urbaner Raum: Benutzergerechte Assistenzsysteme und Netzmanagement, München. www.urban-online.org
- [3] OERTEL, R.; WAGNER, P.; KRIMMLING, J.; KÖRNER, M. (2011). Verlustzeitbasierte LSA-Steuerung eines Einzelknotens. Straßenverkehrstechnik, 55 (9), S. 561-568.
- [4] OERTEL, R.; WAGNER, P. (2011). Delay-Time Actuated Traffic Signal Control for an Isolated Intersection. In: Proceedings 90th Annual Meeting Transportation Research Board (TRB). TRB 2011 (90th Annual Meeting), 23.-27. Jan. 2011, Washington, D.C., USA.
- [5] WAGNER, P. (2009). Verfahren und Vorrichtung zur Steuerung einer Signalanlage. Deutsches Patent- und Markenamt, erteiltes Patent DE102009033431B4.
- [6] OERTEL, R.; WAGNER, P. (2010). Verfahren und Vorrichtung zur Steuerung einer Signalanlage. Deutsches Patent- und Markenamt, erteiltes Patent DE102010027327B3.
- [7] OERTEL, R.; WAGNER, P. (2011). Verfahren und Vorrichtung zur Steuerung einer Signalanlage. Deutsches Patent- und Markenamt, erteiltes Patent DE102011107663B4.
- [8] OERTEL, R.; WAGNER, P., LÄMMER, S. (2012). Verfahren zur Bestimmung einer Verlustzeit, Verfahren zur dynamischen Steuerung einer Signalanlage und Vorrichtung zur Bestimmung einer Verlustzeit. Deutsches Patent- und Markenamt, erteiltes Patent DE102012220094B3.
- [9] KATSAROS, K.; KERNCHEN, R.; DIANATI, M.; RIECK, D. (2011). Performance Study of a Green Light Optimized Speed Advisory (GLOSA) Application Using an Integrated Cooperative ITS Simulation Platform. In Proceedings 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), S. 918–923.
- [10] ERDMANN, J. (2013). Combining Adaptive Junction Control with Simultaneous Green-Light-Optimal-Speed-Advisory. WiVeC 2013, 2.-3. Juni 2013, Dresden, Deutschland. ISBN 9781467363358.
- [11] ERDMANN, J. (2012). Verfahren und Vorrichtung zur dynamischen Steuerung mindestens einer Lichtsignalanlage. Deutsches Patent- und Markenamt, erteiltes Patent DE10201221416483.
- [12] OERTEL, R.; ERDMANN, J.; MANN, A.; WAGNER, P. (2013). VITAL - Vehicle-Actuated Intelligent Traffic Signal Control. Helmholtz Innovation Days 2013 - Partnering Research and Business, 09.-10. Dec. 2013, Berlin. www.projekt-vital.de
- [13] OERTEL, R.; SCHNIEDER, L.; FRANKIEWICZ, F.; TRUMPOLD, J.; KRENKEL, R. (2016). Empirische Absicherung innovativer Steuerverfahren für Lichtsignalanlagen im öffentlichen Straßenraum. In: 17. Symposium Automatisierungs-, Assistenzsysteme

- und eingebettete Systeme für Transportmittel, 17, Seiten 49-59. ITS automotive nord GmbH. 17. Symposium Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel, 10.-11. Feb. 2016, Braunschweig. ISBN 978-3-937655-37-6.
- [14] KRAJZEWICZ, D.; ERDMANN, J.; BEHRISCH, M., BIEKER, L. (2012). Recent Development and Applications of SUMO - Simulation of Urban MObility, International Journal On Advances in Systems and Measurements, no. 5, s. 128–138. www.sumo.dlr.de
- [15] ERDMANN, J.; OERTEL, R.; WAGNER, P. (2015). VITAL: a simulation-based assessment of new traffic light controls. In: Proceedings 18th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 15. - 18. Sep. 2015, Las Palmas de Gran Canaria.
- [16] OERTEL, R.; ERDMANN, J.; MANN, A.; TRUMPOLD, J.; WAGNER, P. (2016). VITAL - Vehicle-Actuated Intelligent Traffic Signal Control: Validation of two new Control Approaches in the Field. In: Proceedings - 11th ITS European Congress. ITS European Congress 2016, 06.-09. Jun. 2016, Glasgow.
- [17] OERTEL, R.; ERDMANN, J.; HESSE, T.; MANN, A.; MARKOWSKI, R.; TRUMPOLD, J.; WAGNER, P. (2017). Steuerung von Lichtsignalanlagen auf der Basis von Fahrzeuginformationen – Umsetzung und Feldtests. In: Proceedings - HEUREKA 2017 - Optimierung in Verkehr und Transport, 22.-23. Mär. 2017, Stuttgart.
- [18] OERTEL, R.; ERDMANN, J.; HESSE, T.; MANN, A.; MARKOWSKI, R.; TRUMPOLD, J.; WAGNER, P. (2017). VITAL: traffic signal control based on C2I communication data – application and results from the field. In: Proceedings - mobil.TUM 2017 - Intelligent Transport Systems in Theory and Practice, 04.-05. Jul. 2017, München.