

Optimierte Steuerungsstrategien für Lichtsignalanlagen durch die Berücksichtigung der Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation (C2X)

FA 3.559

Forschungsstelle: Schlothauer & Wauer GmbH, München

Bearbeiter: Schendzielorz, T. / Schneider, P. /
Künzelmann, M. / Sautter, N. / Höger, W.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: August 2021

1 Kontext und Vorgehen

Seit Jahren, um nicht zu sagen seit Jahrzehnten, laufen die Steuerungsverfahren von Lichtsignalanlagen (LSA) nach dem gleichen Schema. Durch die Kommunikation der Fahrzeuge mit der Infrastruktur (C2X), die aus dem Forschungsumfeld in die Städte einzuziehen beginnt, steht auch die Steuerung der Lichtsignalanlagen vor einem richtungsweisenden Evolutionsschritt.

Darüber hinaus gilt, dass die Schadstoffbelastung der Luft in vielen deutschen Städten aktuell die Verkehrspolitik bestimmt. Die gleichzeitig wachsende Bevölkerung und der damit verbundene Mobilitätsanstieg macht es notwendig, neue Entwicklungen innerhalb der Verkehrsinfrastruktur einzuführen, mit dem Ziel, die Emissionen zu verringern. Für den Kraftfahrzeugverkehr ist eine der wichtigsten Maßnahmen hierfür die Verstärkung des Verkehrsablaufs.

Die dazu notwendige Digitalisierung unserer Gesellschaft ist ein unumkehrbarer Prozess, der seit vielen Jahren anhält. Im Bereich der Straßenverkehrstechnik wird die Digitalisierung durch mehrere Entwicklungen bestimmt:

- Zunehmende Möglichkeit der Kommunikation der Fahrzeuge mit der Infrastruktur
- Entwicklung und Ausbau der Nahbereichskommunikation und des 5G-Mobilfunkstandards
- Umsetzung wichtiger Entwicklungsstufen auf dem Weg zum autonomen Fahren

Die grundsätzliche Frage bei der Kommunikation der Fahrzeuge mit der Infrastruktur ist nicht mehr das Ob, sondern das Wann und das Wie. Es sind mehrere technische Wege denkbar, die wiederum unterschiedliche Auswirkungen auf die Städte und Kommunen haben. Zum einen kann die Durchsetzung der C2X-Kommunikation über den zukünftigen 5G-Mobilfunkstandard und die Ausrüstung der Lichtsignalanlagen mit entsprechenden Kommunikationsmodulen erfolgen, zum anderen ist es auch denkbar, die Lichtsignalanlagen mit einer auf Road Side Units (RSU) basierenden Nahbereichskommunikation auszustatten, die eine Kommunikation der Fahrzeuge mittels ETSI ITS-G5 oder C-V2X mit den LSA-Steuergeräten

ermöglichen. Beides hat Auswirkungen auf die Betreiber, Hersteller und Planer der Lichtsignalanlagen, wobei die verfügbaren Informationen unabhängig vom gewählten Kommunikationskanal bleiben.

Durch die fortschreitende Digitalisierung eröffnen sich neue Datenquellen zur Detektion des Verkehrsgeschehens im Bereich von Lichtsignalangesteuerten Knotenpunkten. Diese technologische Entwicklung kann daher einen maßgeblichen Einfluss auf die Steuerungsverfahren haben. Das Nutzen dieser Möglichkeiten und die entsprechende Anpassung der Steuerungsverfahren ermöglicht es, das Potenzial einer weitblickenden Anlage auszuschöpfen und somit früher als eine konventionelle Detektion auf die Bedürfnisse des Verkehrsgeschehens zu reagieren. Es wäre ein Versäumnis die Verfahren nicht an die Möglichkeiten der neuen Datenquellen, welche C2X bietet, anzupassen und auf diesem Weg zur Verbesserung des Verkehrsflusses in unseren Städten beizutragen. Daher ist es entscheidend die Steuerungsverfahren den neuen Begebenheiten anzupassen und mit der technologischen Evolution schrittzuhalten.

Eine Herausforderung ist es, diese neuen Möglichkeiten mit bestehenden Steuerungen in Einklang zu bringen, da noch über längere Zeiträume hinweg nicht von einer hundertprozentigen Ausstattung des Fahrzeugbestands mit C2X-Technologie auszugehen ist. Aufgrund dieses Umstands wurden drei wichtige Voraussetzungen für die Erstellung einer C2X-LSA-Steuerung vorausgesetzt:

- Einfache Implementierung der C2X-Funktionen in bestehende Logiken
- Gleichbehandlung von C2X-Fahrzeugen und konventionellen Fahrzeugen
- Anwendungsfälle/Komponenten sollen komplett in einer Logik umgesetzt werden können

Das Hauptziel dieses Forschungsprojekts bestand darin, das Potenzial von C2X-Informationen zu analysieren und darauf aufbauend Steuerungsfunktionen und -strategien für signalisierte Knotenpunkte zu entwickeln. Die Auswirkungen der Einbeziehung von aktiv versendeten Fahrzeugdaten in die LSA-Steuerung auf den Verkehrsablauf wurde mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation untersucht. Darüber hinaus wurde davon ausgegangen, dass bereits bei geringen C2X-Penetrationsraten signifikante Verbesserungen im Hinblick auf die Umweltbelastungen durch die Reduzierung von Halten und Reisezeitverlusten erreicht werden können.

Im Projekt werden zunächst neue C2X-Steuerungsfunktionen entwickelt, welche es ermöglichen, die von Fahrzeugen versendeten CAM-Nachrichten zu verarbeiten. Diese Funktionen wur-

den im Anschluss in die Steuerungslogik integriert und somit ein C2X-Steuerungsablauf umgesetzt. Die neue C2X-Logik wurde für drei Laborknotenpunkte umgesetzt; einen Knotenpunkt für außerorts (3-armig) und zwei für innerorts (3- und 4-armig). Die umgesetzten C2X-Steuerungen wurden im Anschluss unter unterschiedlichen Penetrationsraten und Verkehrsbelastungen in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation getestet und die Ergebnisse ausgewertet und miteinander verglichen.

2 Die neu entwickelte C2X-Steuerung

Ein entscheidender Baustein des Projekts war die Konzeption neuer Steuerungsverfahren beziehungsweise die Einbeziehung der C2X-Daten in die Steuerung der Lichtsignalanlage. Der Umstand, auf aktuelle Einzelfahrzeugdaten in Echtzeit zugreifen zu können, eröffnet neue Möglichkeiten in den bisherigen Steuerungsverfahren.

Eine vollständige Durchdringungsrate der C2X-Technologie über alle Verkehrsteilnehmer hinweg beziehungsweise das Sicherstellen der Systemverfügbarkeit wird nur schwer zu beherrschen sein. Aus diesem Grund erscheint es als sinnvoll, anhand bestehender LSA-Steuerungen die Potenziale dieser zusätzlichen Informationen darzustellen und neue innovative Verfahren zu etablieren. Das heißt durch die Verwendung neuer Verkehrskenngrößen aufgrund der C2X-Technologie können vorhandene Steuerungen verbessert und deren Steuerpotenziale erweitert werden. Die neuen Funktionen und Steuerungskonzepte dienen dazu, die Anzahl der Halte- und damit auch der Anfahrvorgänge zu reduzieren. Dabei werden die Grundlagen der erprobten verkehrssabhängigen Steuerung, wie die Nutzung von Phasen und Phasenübergängen, die Freigabezeitbemessung von Phasen und die Anforderung von Phasen und deren Tausch, weiterhin angewendet.

Grundlegend sind folgende Verbesserungen möglich:

- Vorrasschauende Phasenforderung
- Angepasster Freigabezeitabbruch und dynamische Freigabezeitverlängerung
- Verkehrsadaptive Phasenfolge

Grundlage für die neuen C2X-Steuerungsentscheidungen ist der Ankunftszeitpunkt der Fahrzeuge (ETA – estimated time of arrival) an der Haltlinie. Dieser Wert wird sekundlich für jedes Fahrzeug basierend auf Position und Geschwindigkeit des Fahrzeugs neu berechnet. Weiterhin werden mithilfe von höherwertigen Funktionen sekundlich Informationen abgeleitet und für Steuerungsentscheidungen zur Verfügung gestellt. Im Folgenden wird eine Phase, die derzeit nicht aktiv ist, für die aber eine Anforderung besteht, als Zielphase bezeichnet. Es kann mehrere Zielphasen geben, die zur Auswahl stehen. Die Detektionsreichweite der Funktionen wurde durch einen Parameter in der Logik auf 300 m limitiert. Damit soll ein realistischer Emp-

fangsbereich einer RSU an einem Knotenpunkt simuliert werden.

Für die Autoren war es von entscheidender Bedeutung, ein Steuerungsverfahren zu ermöglichen, das für den Anwender, sprich projektierenden Verkehrsingenieur, Steuergerätehersteller und auch Kommune, nachvollziehbar und verständlich ist. Es wurde angenommen, dass dies die Einsatzwahrscheinlichkeit des Konzepts deutlich erhöht im Vergleich zu einem "Black Box-Verfahren".

Das Verfahren muss mit "herkömmlichen" Datenquellen (klassische Detektionstechnologien) genauso wie mit "neuen" Datenquellen (CAM-Nachrichten direkt vom Fahrzeug) zurechtkommen. Das Verfahren muss den Verkehr noch steuern, auch wenn kein Fahrzeug aktiv Daten sendet. Das Verfahren soll auch geringe Penetrationen abbilden können und C2X-Fahrzeuge und konventionelle Fahrzeuge ähnlich gewichten.

Der bisherige Ansatz der Strukturierung der Steuerung in Phasen wurde nicht aufgegeben. Die verkehrstechnischen Ansätze zur Steuerung des Verkehrs, wie zum Beispiel die bevorrechtigte Behandlung von Verkehrsströmen, wird weiterhin gewährleistet sein.

Es werden innerhalb der sequenziellen Abarbeitung der Steuerungslogik folgende Komponenten unterschieden:



Bild 1: Sequenzielle und parallele Abarbeitung der Steuerungslogik

Der Durchfahrtenvergleich, die C2X-Anforderung und die konventionelle Anforderung werden sequenziell abgearbeitet. Die Freigabezeitumverteilung sowie die Koordinierungsfunktionen sind prinzipiell während der gesamten Logikabarbeitung aktiv beziehungsweise werden berücksichtigt.

Durchfahrtenvergleich

Vergleich der Anzahl der in der verbleibenden Phasendauer noch durchfahrenden Fahrzeuge auf allen Fahrstreifen unter Berücksichtigung der Zeitbedarfswert-Steuerung (Freigabezeitbemessung) mit der Anzahl der möglichen Durchfahrten auf den jeweiligen Fahrstreifen aller Zielphasen unter Berücksichtigung der Dauer des Phasenübergangs, der stehenden Fahrzeuge (Stauabbau) und eines Sichtvorlaufs. Ist die Anzahl der durchfahrenden Fahrzeuge in einer Zielphase größer als die in der aktuellen Phase, wird die aktuelle Phase abgebrochen und in die jeweilige Zielphase gewechselt. Dies gilt unabhängig von einer aktuell vorhandenen Freigabezeitbemessung der aktuel-

len Phase (sowohl konventionell als auch auf Basis der Zeitbedarfswert-Steuerung). Andernfalls wird in der aktuellen Phase verblieben.

C2X-Anforderung und Bemessung

Grundsätzlich wird vor einem Phasenwechsel geprüft, ob die aktuelle Phase bemessen werden soll. Dazu wird sowohl die konventionelle Zeitlückensteuerung als auch die neue Zeitbedarfswert-Steuerung berücksichtigt.

Falls keine Bemessung der aktuellen Phase erforderlich ist oder die maximale Phasendauer (beziehungsweise das Ende des Verlängerungsbereichs bei koordinierten Steuerungen) erreicht ist, erfolgt eine Prüfung der Durchfahrten aller potenziellen Zielphasen. Es wird in die Phase gewechselt, bei der mehr Durchfahrten möglich sind. Auch hier werden alle Fahrstreifen der Zielphasen, die Dauer der Phasenübergänge sowie die stehenden Fahrzeuge (Stauabbau) und ein Sichtvorlauf berücksichtigt.

Bei einer C2X-Anforderung wird grundsätzlich versucht, punktgenau den Phasenübergang einzuleiten. Der Phasenwechsel soll in dem Moment gestartet werden, in dem der Phasenübergang (beziehungsweise der Grünbeginn im Phasenübergang) inklusive des Sichtvorlaufs der Restfahrzeit eines Fahrzeugs in einer angeforderten Phase entspricht. Damit kann das Fahrzeug den Knotenpunkt ohne Halt passieren und gleichzeitig kommt es nicht zu einem unnötig frühen Wechsel in die angeforderte Phase.

Anforderung und Bemessung

Im letzten Schritt erfolgt die konventionelle Phasenforderung, um auch konventionellen Fahrzeugen eine Freigabe zu ermöglichen. Ein Phasenwechsel erfolgt in Abhängigkeit der angeforderten Phasen in einer vordefinierten Reihenfolge, wobei in der aktuellen Phase zunächst eine Freigabezeitbemessung erfolgt. Auch hier wird sowohl die konventionelle Bemessung als auch die Bemessung auf Basis des mittleren Zeitbedarfswerts berücksichtigt.

Freigabezeitverteilung

Anhand der vorhandenen Fahrzeuge wird die notwendige Dauer der Nebenrichtungsphasen berechnet und gegebenenfalls Ersparnisse auf andere Phasen verteilt. Dabei wird die Dauer der Hauptrichtungsphase grundsätzlich nicht reduziert. Es können auch Phasendauern zwischen Nebenrichtungsphasen umverteilt werden. Um auch hier einen möglichen Fehler bei über- oder unterproportional auftretenden konventionellen Fahrzeugen zu minimieren, wird die Freigabezeitverteilung erst bei einer Penetrationsrate von ca. 70 % empfohlen.

Koordinierungsfunktion

In einem vordefinierten Zeitfenster werden in der konventionellen Steuerung die Verkehrsströme erwartet. Dies wird durch

die Rahmenpläne in der Steuerung abgebildet. Die Koordinierungsfunktion erkennt die Ankunft eines Pulks, die früher erfolgt als in den Rahmenplänen vordefiniert. Entsprechend passt die Koordinierungsfunktion den Freigabebeginn am Knoten an. Die Rahmenpläne können somit modifiziert werden gemäß der verbesserten Wahrnehmung des Verkehrsgeschehens durch die Information der C2X-Fahrzeuge. Somit wird ein variabler Freigabezeitbeginn in koordinierten Steuerungen ermöglicht.

3 Wirksamkeit der C2X-Steuerung gegenüber Standardverfahren

Im Rahmen des Projekts wurden an drei Knotenpunkten und einer Koordinierungsstrecke verschiedene Steuerungskomponenten entwickelt, um zuvor definierte Anwendungsfälle abzudecken. Die Steuerungskomponenten C2X-Anforderung, C2X-Bemessung, Durchfahrtenvergleich, Freigabezeitverteilung und Koordinierungsfunktionen wurden hinsichtlich ihrer Anwendungsmöglichkeiten, Einsatzgrenzen und Parametrisierung untersucht sowie in Abhängigkeit der Penetrationsrate und Auslastungsgrade in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation integriert und getestet.

Es konnte gezeigt werden, dass die Verwendung der CAM-Nachrichten der Fahrzeuge in der LSA-Steuerung einen deutlichen positiven Effekt auf den Verkehrsablauf hat. Neben der Knotenpunktauslastung hat vor allem die Penetrationsrate maßgebenden Einfluss auf die Ergebnisse. Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass bereits bei geringen Penetrationsraten bis zu 5 % der Halte eingespart werden konnten. Mit zunehmender Penetrationsrate konnten die Anzahl der Halte um teilweise über 25 % reduziert werden. Gleichzeitig ist zu beobachten, dass die Verlustzeiten bei geringen Penetrationsraten ebenfalls minimal sinken (2 %) oder in Einzelfällen um bis zu 10 % steigen. Bei hohen Penetrationsraten konnten die Verlustzeiten um bis zu 10 % reduziert werden.

Mit dem Blick auf die Penetrationsraten wird ersichtlich, dass die Steuerungskomponenten in zwei Gruppen eingeteilt werden können. Die Gruppe, welche unabhängig einer Penetrationsrate eingesetzt werden kann, beinhaltet die beiden Komponenten C2X-Anforderung und C2X-Bemessung. Durch Sensitivitätsanalysen und die Ergebnisse der Simulation zeigte sich eine positive Wirkung der beiden Module bereits bei geringen Penetrationsraten bis hin zur Vollausstattung der Fahrzeuge. Die beiden Komponenten können durch die erweiterte Detektionsfähigkeit den Beginn der Grünzeit verfrühen beziehungsweise die Grünsdauer verlängern. Diese leichten Eingriffe in die Steuerung führen zu der penetrationsunabhängigen Empfehlung. Die andere Gruppe bilden die Komponenten Freigabezeitverteilung, Durchfahrtenvergleich und Koordinierungsfunktionen. Diese Funktionen greifen relativ stark in die Steuerung ein, weshalb der Anteil an CAM-Nachrichten sendenden C2X-Fahrzeugen für die Entscheidungen ausreichend groß sein muss, damit die konventionellen Fahrzeuge nicht diskriminiert

werden beziehungsweise damit die Verkehrssituation durch wenige C2X-Fahrzeuge von den Komponenten nicht falsch gedeutet wird. Die Schwelle zum Aktivieren dieser Komponenten wurde mit 70 % Penetrationsrate als gut geeignet angenommen. Hier könnten weitere Untersuchungen zur Ermittlung der optimalen Penetrationsrate durchgeführt werden.

Die Verkehrsauslastung hat außerdem einen großen Einfluss auf die Ergebnisse der Simulation. Zunächst kann festgestellt werden, dass sich mit abnehmender Verkehrsbelastung die Anzahl der Halte und die Verlustzeit reduzieren. Dieser Rückgang kann wie folgt erklärt werden: Die C2X-Steuerung kann sehr flexibel und vorausschauend die Grünzeiten auf die ankommenden Fahrzeuge verteilen. Bei zunehmender Fahrzeuganzahl kann die Grünzeit weniger flexibel verteilt werden. Dies führt zu einer Verstetigung der Grünzeitdauern, weshalb ein geringer Spielraum zur Vermeidung von Halten zur Verfügung steht. Zu dieser flexiblen Grünzeitverteilung gehört auch der Phasentausch. Dieser Phasentausch fördert geringe Verlustzeiten durch Reduktion der Halte bei geringen Auslastungen. Diese Komponente führt mit steigender Auslastung zu größeren Übergangszeiten, bedingt durch die ungünstige Phasenfolge, und somit zu steigenden Halten beziehungsweise Verlustzeiten. Aus diesem Grund wird der Phasentausch ab einer hohen Auslastung nicht mehr ausgeführt und eine klassisch optimierte Phasenfolge ausgeführt.

Der Steuerungsparameter "mittlerer Zeitbedarfswert" ist abhängig von der Auslastung. Ein hoher Bedarfswert führt zu einer großzügigen Grünzeitbemessung zulasten wartender Fahrzeuge. Ist die Verkehrsbelastung gering, sind die Auswirkungen der Bemessung auf wenige wartende Fahrzeuge überschaubar. Erhöht sich allerdings die Verkehrsbelastung, tritt bei einem hohen mittleren Zeitbedarfswert der Effekt ein, dass die Grünzeit durch wenige Bemessungsfahrzeuge mit großen Abständen zulasten vieler wartender Fahrzeuge verlängert wird. Die Fahrzeuganzahl je Grünzeit wird dadurch geringer. Dies spiegelt sich wiederum in einer Erhöhung der Verlustzeit beziehungsweise einer Erhöhung der Anzahl haltender Fahrzeuge wider. Daher wurden unterschiedliche Zeitbedarfswerte für die verschiedenen Verkehrsauslastungen gewählt. Für Auslastungsgrade geringer als 0,5 wurde ein mittlerer Zeitbedarfswert von 5,2 s angesetzt. Für höhere Auslastungsgrade wurde mit einem Zeitbedarfswert von 3,0 s gearbeitet. Anknüpfend an dieses Forschungsprojekt sollte mit weiteren Untersuchungen ein optimaler, auf die Verkehrsbelastung angepasster Zeitbedarfswert, ermittelt werden. Eine Zusammenfassung der identifizierten Parameter und Grenzwerte gibt Bild 2 wieder.

4 Resümee

Ungeachtet des verbleibenden Forschungsbedarfs stehen bereits heute Möglichkeiten zur Verfügung, Fahrzeuginformationen, die über CAM-Nachrichten versendet werden, in verkehrsabhängigen Steuerungen zu nutzen und die Auswirkungen zu testen. Die tatsächliche Realisierung in kommerziellen Steuer-

geräten steht ebenfalls kurz vor der Fertigstellung. Auch wenn hohe Penetrationsraten erst in einigen Jahren vorhanden sein werden, sind einige Funktionen bereits bei sehr geringen Penetrationsraten einsetzbar und führen zu Verbesserungen. Zuletzt bleibt darauf hinzuweisen, dass CAM-ähnliche Fahrzeuginformationen, die über eine Verkehrszentrale an die lokalen Steuerungen übertragen werden, in gleicher Art und Weise verwendet werden können.

Die generelle Vernetzung von Fahrzeugen miteinander beziehungsweise mit der Infrastruktur hat mehrere positive Effekte. Nicht nur die Steuerung, sondern auch die Sicherheit und der freie Verkehrsablauf auf der Strecke sind Wegbereiter für das hochautomatisierte Fahren. Eine C2X-Steuerung bildet nur einen Baustein dieses Gesamtsystems. Im Zuge von Aufrüstungen der Bestandssteuerung besteht die Möglichkeit, Knotenpunkte inklusive deren Steuergeräte, um eine C2X-Fähigkeit aufzurüsten. Die in diesem Projekt erarbeiteten Funktionen können in diesem Zuge einfach implementiert werden, sodass die Kosten für eine neue Steuerung verhältnismäßig gering sind. Eine erste Potenzialabschätzung einer umsetzungsfähigen, regelbasierten C2X-Steuerung wurden im Projekt durchgeführt. Allerdings ist das volle Potenzial noch nicht umfassend erforscht und es bestehen noch zahlreiche Optimierungsansätze. Hier sehen die Autoren noch weiteren Forschungsbedarf. Die Zukunft des vernetzten Fahrens wird in allen Bereichen neue Lösungsoptionen ermöglichen.

Auslastungsgrad

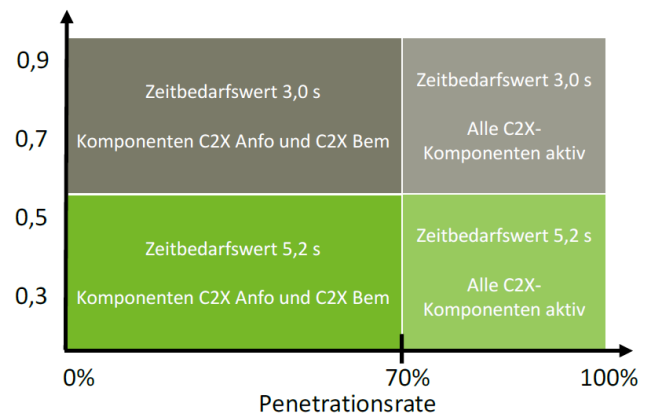


Bild 2: Identifizierte Parametrierungsmatrix