

Konzept zur Realisierung eines GLOSA-Systems ohne Datenverbindung zu einem Verkehrssteuergerät

Concept for the realization of a GLOSA system without data connection to a traffic controller

Tony Glimm
Hartmut Zadek

Lehrstuhl für Logistik
Fakultät für Maschinenbau
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Die inhaltliche Schwerpunktlegung des Konzepts besteht in Entwurf, Planung und Durchführung eines GLOSA-Systems welches auf eine Anbindung eines LSA-Controllers verzichtet. Aufgrund dessen soll eine hohe Flexibilität des Systems bei geringen Kosten erreicht werden, sodass diese schnell und an die Gegebenheiten von Kommunen angepasst werden kann. Dies hat den Zweck, Kommunen dabei zu unterstützen ihre Ziele bzgl. der Treibhausgasminderung zu erreichen sowie den Verkehr aufgrund von reduzierten Abbrems- und Anfahrvorgängen zu verflüssigen. Zielstellung ist die Entwicklung eines prototypischen Systems mit anschließendem Pilotbetrieb in einer Kommune Sachsen-Anhalts.

[Schlüsselwörter: *Vehicle-to-Everything, V2X, Vehicle-to-Infrastructure, V2I, GLOSA, optische Sensoren, LSA-Controller*]

The concept focuses on the design, planning and implementation of a GLOSA system that does not require the connection of an traffic light controller. Due to this, a high flexibility of the system at low costs shall be achieved, so that it can be adapted quickly and to the conditions of municipalities. The purpose of this is to support municipalities in achieving their greenhouse gas reduction goals and to liquefy traffic due to reduced braking and starting procedures. The objective is the development of a prototypical system with subsequent pilot operation in a municipality of Saxony-Anhalt.

[Keywords: *Vehicle-to-Everything, V2X, Vehicle-to-Infrastructure, V2I, GLOSA, optical sensor, traffic light controller*]

1 EINLEITUNG (PROBLEMSTELLUNG?)

Ziel der Bundesregierung ist es, bis zum Jahr 2050 treibhausgasneutral zu werden. Dies schließt den Verkehrssektor mit ein [BMU21b]. Für das Jahr 2030 ist ein Zwischenmeilenstein zur Reduzierung um 96 Millionen t CO₂e

im Vergleich zum Referenzjahr 1990 definiert. Im Jahr 2014 betrug die Emissionen im Verkehrssektor noch 160 Mt CO₂e und im Jahr 2020 betrug diese noch 146 Mt CO₂e, was lediglich einer Minderung von 11% im Vergleich mit dem Referenzjahr 1990 entspricht. Hierbei profitiert die 11 %ige Senkung der Emissionen noch von den Folgen der COVID-19 Pandemie, welche zu Beginn einen Rückgang der Mobilität zur Folge hatte, von den insgesamt 19 Mt CO₂e gehen lediglich 2 Mt CO₂e auf Fortschritte im Straßenverkehr zurück [BMU21a]. Eine Säule zur Minderung der im Verkehr erzeugten Emissionen ist die Elektromobilität. Bis 2020 sollten eine Millionen Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen fahren [BMV11]. Erreicht wurde dieses Ziel nicht. Lediglich 358.598 der insgesamt Ende 2020 59.020.091 zugelassenen Fahrzeuge waren reine Elektrofahrzeuge [Kra21]. Um das von der Bundesregierung angedachte Ziel im Jahr 2030 erreichen zu können, müssen neben den Bestrebungen im Ausbau der Elektromobilität auch Lösungen zur Emissionsminderung für den derzeitigen Fahrzeugbestand welcher zum Großteil auf Verbrennungsmotoren aufbaut gefunden werden. Ein Abwarten bis ein Großteil des nationalen Fahrzeugbestands durch E-KFZ abgedeckt wird, wird ein Verfehlen der genannten Ziele zur Folge haben.

Das Projekt TalkToMe hat das Ziel einen Pilotbetrieb mit einem über den Fahrzeugkommunikationsstandard V2X (Vehicle-to-everything) realisierten GLOSA (Green Light Optimal Speed Advisory)-Systems durchzuführen. Hierbei werden dem Fahrer Daten zum derzeitigen Schaltzustand der nächsten Lichtsignalanlage auf der derzeitigen Strecke sowie eine Geschwindigkeitsempfehlung übermittelt. Ziel ist es, eine Verflüssigung des Verkehrs durch eine Verringerung der Abbrems- und Anfahrsvorgänge zu erreichen. Vorteilhaft hierbei ist, dass dies unabhängig von der Antriebstechnologie einen Beitrag zur Minderung der Treibhausgasemissionen leisten kann. Simulationen haben gezeigt, dass solche Systeme den Energieverbrauch und somit auch die Treibhausgasemissionen um bis zu 13% an

den entsprechend ausgestatteten Kreuzungen reduzieren können [Eck13; Kat11]. Bereits eine Ausstattung von 40% aller Fahrzeuge und 50 % der Lichtsignalanlagen in einem Stadtgebiet können eine Reduzierung der Emissionen von 5 % und eine reduzierte Standzeit von 30 % bewirken [Leb15]. Ein Problem bei der Erreichung der Ausstattungsquote der Infrastruktur sind bedenken der Kommunen bzgl. Kosten und Sicherheit bei Anschluss der benötigten Hardware, der Roadside Units (RSU) an einen Lichtsignalcontroller. Um eine schnellere Quote an installierter Hardware an der Infrastruktur zu erreichen wird in TalkToMe in Zusammenarbeit mit dem ifak (Institut für Automation und Kommunikation e.V.) ein technisches System erarbeitet und erprobt mit welchem trotz einer nicht vorhandenen Verbindung zum Lichtsignalcontroller eine Übertragung aller für ein GLOSA-System benötigten V2X-Nachrichten möglich ist. Dieses System wird in einem Pilotbetrieb in einer Kommune Sachsen-Anhalts erprobt. Im Anschluss des Pilotbetriebs wird eine Wirkungsanalyse durch Verkehrsflusssimulation durchgeführt. Das hierbei entstehende Simulationsmodell soll anschließend auf weitere Kommunen übertragbar sein, um auch dort Einsparpotenziale durch Ampelassistenten abschätzen zu können.

2 STAND DER TECHNIK

In diesem Abschnitt werden die für ein GLOSA-System benötigten Nachrichtentypen und auch die benötigte Hardware beleuchtet. Die Kommunikationstechnologie Vehicle-to-everything (V2X) ermöglicht vielfältige Anwendungen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit, Effizienz der Verkehre und Energieeinsparungen. Eine dieser Anwendungen dieser Technologie ist ein GLOSA-System (Green Light Optimal Speed Advisory). Frühere Arbeiten konnten bereits eine Reduktion der Abbrems- und Anfahrvorgänge durch Implementierung eines GLOSA-Systems darstellen (siehe [Kat11]). Ziel des GLOSA-Systems ist es, den Nutzer:innen eine Geschwindigkeitsempfehlung zu bieten, welches ein Überqueren der nächsten Kreuzung während der aktuellen Grünphase der entsprechenden Lichtsignalanlage oder, falls derzeit eine Rotphase anliegt, dass das Erreichen der Kreuzung ohne Stopp beim Beginn der nächsten Grünphase erreicht werden kann [Ser13]. Dies wird in der Abbildung 1 und Abbildung 2 dargestellt. Die so reduzierten Abbrems- und Anfahrvorgänge tragen somit zu einer Verflüssigung des Verkehrs bei und reduzieren den Energieverbrauch der Fahrzeuge und somit auch der Treibhaus-, Stickoxid- und Feinstaubemissionen [Leb15; Tie10]. Dies hat nicht nur Auswirkungen auf den derzeitigen stark durch Verbrennungsmotoren geprägten Fahrzeugbestand, sondern auch auf die zukünftigen E-KFZ.

Zur Bestimmung einer Geschwindigkeitsempfehlung sind verschiedene Daten notwendig. Diese sind:

- Die Topologie und Position der anzufahrenden Kreuzung (Kreuzungstopologie) (MapData (MAP)),

- der derzeitige Signalzustand der nächsten Lichtsignalanlage (Signal Phase and Timing (SPaT)),
- die Dauer bis zur nächsten Grünphase (Time-to-Green(TTG)) (SPaT),
- die aktuelle Geschwindigkeit des Fahrzeugs,
- und die aktuelle Position des Fahrzeugs.

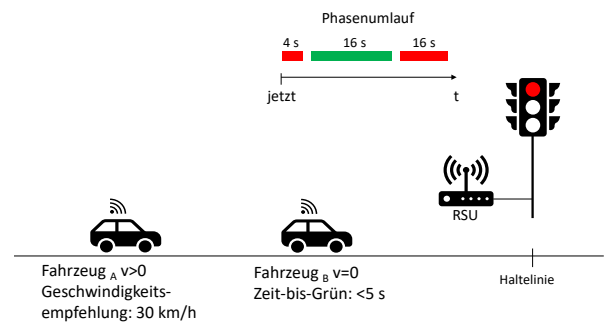


Abbildung 1: Kreuzungsnäherung Szenario 1 nach [Sta17]

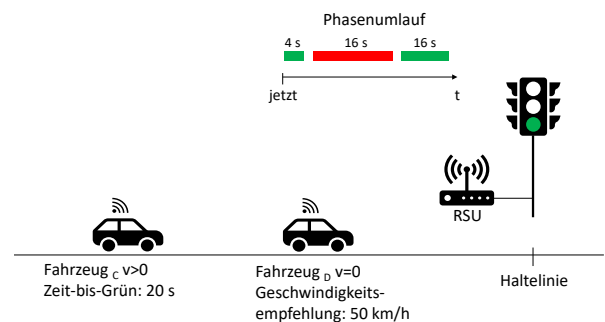


Abbildung 2: Kreuzungsnäherung Szenario 2 nach [Sta17]

Im folgenden Abschnitt wird auf die für ein GLOSA-System notwendigen Nachrichten MAP und SPaT sowie deren Struktur eingegangen:

MAP:

Diese Nachricht bietet dem Empfänger eine vollständige Beschreibung der Geometrie einer oder mehrere Kreuzungen. Jeder Kreuzung wird eine einmalige ID zugewiesen, um später eine Zuordnung zu ermöglichen. Mit den erhaltenen Informationen sind die Verkehrsteilnehmer wie Autos, Motorräder aber auch Fußgänger und Radfahrer in der Lage ihre Position mit einer Genauigkeit auf Fahrspur-Ebene innerhalb des Kreuzungsbereichs zu bestimmen [Miu19]p159]. Die MAP nach SAE J2735 [SAE20] enthält die folgende Information:

- Kreuzungs-ID, zur eindeutigen Zuordnung der Daten zu einer gegebenen Kreuzung welche später zur Zuordnung genutzt wird, da sie einmalig ist,

- Knoten, mit Distanz welche in Relation zum Referenzpunkt angegeben werden. Diese sind für die Positionierung der Fahrspuren notwendig,
- Fahrspur-ID's, für eine eindeutige Zuordnung,
- eine Liste aller Signalgeber, welche den korrespondierenden Fahrspuren zugeordnet werden,
- die zugelassenen Höchstgeschwindigkeiten jeder Fahrspur,
- eine Liste mit erlaubten Fahrmanövern für jede Signalphase jedes Signalgebers,
- und eine Liste mit den Verbindungen der verschiedenen Fahrspuren untereinander.

Die hier genannten Informationen stellen lediglich die Mindestanforderungen dar. Die MAP kann durch weitere optionale Informationen erweitert werden.

SPaT:

Diese Art der Nachricht stellt den Verkehrsteilnehmer:innen Informationen über die aktuell aktiven Signalphasen der einzelnen Fahrspuren, der nächsten anliegenden Signalphase sowie deren Dauer zur Verfügung. Diese Nachricht kann Informationen für eine einzelne oder mehrere Kreuzungen zur Verfügung stellen. Eine Zuordnung der Daten erfolgt beim Empfänger basierend auf der Kreuzungs-ID, welche im Nachrichtenkopf enthalten ist. In Kombination, mit der bereits vorgestellten MAP-Nachricht, ermöglichen sich aus der Kombination dieser Informationen viele Einsatzmöglichkeiten. Darunter fallen beispielsweise: Warnungen vor Überqueren bei Rot, Signalpriorität für Einsatzfahrzeuge oder die hier betrachtete Möglichkeit einer Geschwindigkeitsempfehlung zur optimalen Durchquerung eines Korridors bei Grünphasen (Grüne-Welle-Assistent). Die SPaT enthält unter anderem folgende Informationen [Wol19; Miu19]:

- Kreuzungs-ID, damit die Daten der SPaT den entsprechenden Daten der MAP zugeordnet und gemeinsam verwendet werden können
- Zeitstempel, in Millisekunden in UTC zu welcher die Nachricht erstellt wurde, kann genutzt werden um die Aktualität der Nachricht zu kontrollieren
- Eine Liste der verschiedenen möglichen Fahrmanöver an einer Kreuzung basierend auf den Signalgebern und eine Beschreibung der derzeitigen Phasen:
 - Signalgruppe, welches zur Zuordnung genutzt wird
 - State-time-speed, dieses Feld enthält die Kerninformationen der SPaT und beinhaltet:

- Den Schaltzustand des Signalgebers sowie den korrespondierenden zugelassenen Fahraktionen (Rot = stehen, Grün = fahren) (in Tabelle 1 ist eine Übersicht über alle möglichen Fahraktionen zu sehen),
- Das Timing der Signalgeber, mit den hier bereitgestellten Daten bzgl. Phasenbeginn, Minimaler und Maximaler Dauer

Wie bei der MAP, stellen die hier genannten Informationen sind lediglich die Mindestanforderungen dargelegt. Die SPaT kann durch weitere optionale Informationen erweitert werden.

No.	Signal-farbe	Fahraktion
0	Keine	Dieser Status wird für einen unbekanntem Zustand oder Fehler verwendet
1	LSA aus	Fahrzeug an Haltelinie stoppen. Nur weiterfahren falls sicher
2	Rot (Blinkend)	Fahrzeug an Haltelinie stoppen. Nur weiterfahren falls sicher
3	Rot	Fahrzeug an Haltelinie stoppen. Nicht weiterfahren.
4	Rot-Gelb	Fahrzeug stoppen. Weiterfahrt vorbereiten.
5	Grün	Mit Vorsicht weiterfahren. Jedem entgegenkommenden Verkehr Vorfahrt gewähren.
6	Grün	Weiterfahrt in angegebener Richtung.
7	Gelb	Stopp vorbereiten. Weiterfahrt falls halten nicht möglich.
8	Gelb	Stopp vorbereiten. Weiterfahrt in angegebener Richtung falls halten nicht möglich.
9	Gelb (Blinkend)	Mit Vorsicht fortfahren. An der Kreuzung kann es zu Verkehrskonflikten kommen.

Tabelle 1: Liste der möglichen Zustände und der zugehörigen Phasen an signalisierten Kreuzungen [SAE20; Miu19]

HARDWARE

Die zur Realisierung des GLOSA-Systems notwendigen Nachrichten SPaT und MAP werden mittels einer Roadside Unit (RSU) versandt und mittels der äquivalenten Empfangseinheit in einem Fahrzeug, der Onboard Unit (OBU).

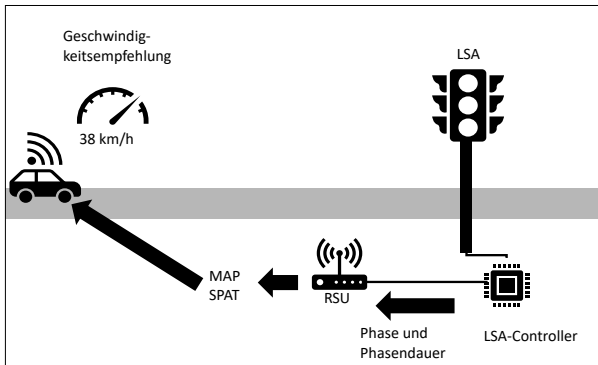


Abbildung 3: Prinzipdarstellung des Informationsflusses eines konventionellen GLOSA-Systems

Bei den konventionellen Systemen dieser Art, wird die RSU mit den Lichtsignalsteuergerät (LSA-Controller) verbunden. Der prinzipielle Aufbau und Verbindung der notwendigen Geräte sind in der Abbildung 3 dargestellt. Hierbei sind die Daten zur aktuellen Phase und Phasendauer der Signalgeber durch den LSA-Controller einer gegebenen Kreuzung vorhanden und werden der RSU zur Verfügung gestellt, um die SPaT Nachricht erstellen zu können. Die MAP wird einmalig auf der RSU für eine oder mehrere Kreuzungen hinterlegt und kontinuierlich versandt. Der prinzipielle Aufbau einer RSU kann der Abbildung 4 entnommen werden.

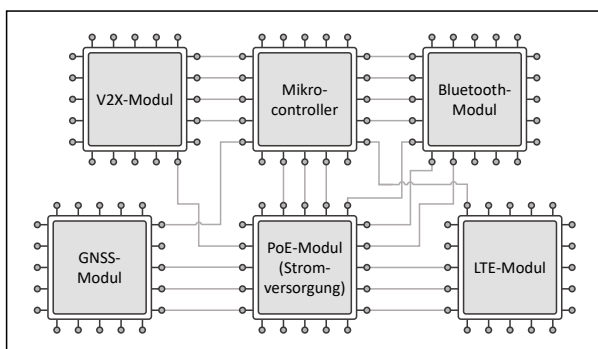


Abbildung 4: wesentliche Bestandteile der verwendeten RSU

3 VORGEHEN

Bei der Akquise von Kommunen als Projektpartner:innen bei der damaligen Planung des Projektes TalkToMe wurde ersichtlich, dass die Bedenken bzgl. der Anbindung eines Geräts an den LSA-Controller so groß sind, dass dies vermieden werden sollte. Aus diesem Grund entschloss man sich in dem Projekt TalkToMe dazu einen Ansatz zu verfolgen, welcher eine Verbindung zum LSA-Controller nicht benötigt und alle für die Bildung der SPaT notwendigen Informationen anders aufbereitet/erhält.

ÄNDERUNGEN AN DER HARDWARE IM PROJEKT TALKTOME

Da die Informationen für die SPaT nicht über den LSA-Controller bezogen werden sollten, musste ein alternativer Lösungsweg zur Bereitstellung dieser Informationen gefunden werden. Zusammen mit dem ifak wurde hierfür ein Konzept entwickelt, welches zwei Alternativen umfasst. Die erste Methode nutzt eine Kamera welche auf einen Referenzsignalgeber gerichtet ist. Diese verfügt über einen Einplatinencomputer, welcher genutzt wird, um im aufgenommenen Bild eine Auswertung der aktuellen Signalphase des beobachteten Signalgebers durchzuführen. So wird die Information der aktuellen Signalphase aufgenommen und wird der mit dem Einplatinencomputer verbundenen RSU zur Verfügung gestellt. Anschließend wird basierend auf dem ermittelten Phasenwechselzeitpunkt und der aktuellen Signalphase aus einem in der RSU hinterlegten Signalablaufplan der gesamten Kreuzung die Phasendauer der aktuellen Phase bestimmt. Mit den nun vorhandenen Daten zur aktuellen Signalphase und der Phasendauer kann wie oben beschrieben eine SPaT-Nachricht erzeugt und versandt werden. Die MAP wird, wie auch bei der konventionellen Methode, per LSA-Controller in der RSU hinterlegt und periodisch ausgesandt. Die Empfangseinheit im Fahrzeug kann ohne Anpassungen dann die standardisierten Nachrichten SPaT und MAP nutzen, um eine Geschwindigkeitsempfehlung zu bestimmen. Der prinzipielle Aufbau der notwendigen Geräte kann der Abbildung 5 entnommen werden. Die zweite Alternative verwendet einen Photodetektor, welcher unter den Schirm der Signalgeber angebracht wird. Dieser misst wann ein Signalgeber ein Signal aussendet. Kabellos wird dieses logische Signal dann an einen Einplatinencomputer gesandt, der wie in der ersten Alternative anhand eines hinterlegten Signalablaufplans die nächste Signaldauer bestimmen kann. Für beide Methoden ist es ausreichend lediglich einen Signalgeber mit den Sensoren auszurüsten, da über den hinterlegten Signalablaufplan zuverlässig auch Aussagen für alle anderen Signalgeber der Kreuzung getroffen werden können, da diese stets in Relation zum beobachteten Signalgeber stehen. Da bei der konventionellen Herangehensweise eine Stromversorgung der RSU über den LSA-Controller mittels Power over Ethernet (PoE) erfolgt und dies in der in TalkToMe gewählten Herangehensweise wegfällt, war es nötig eine alternative Quelle zur Stromversorgung zu finden. In Zusammenarbeit mit dem Kooperationspartner Tiefbauamt Halle, welche das Vorhaben durch bereitstellen einer Teststrecke sowie der notwendigen Infrastruktur unterstützen, war es möglich eine alternative Stromversorgung über die an der Teststrecke befindlichen Straßenbeleuchtung zu finden, was ebenfalls in der Abbildung 5 dargestellt ist. Über diesen Weg werden sowohl die RSU als auch das Kamerasystem mit Energie versorgt.

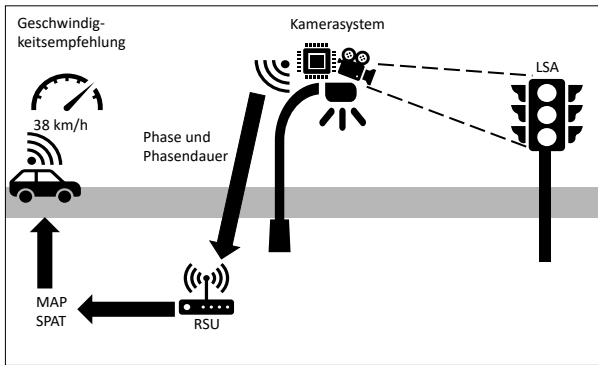


Abbildung 5: Prinzipdarstellung des Informationsflusses des für TalkToMe angepassten GLOSA-Systems

Im Projekt TalkToMe wird zur weiteren Erhöhung der Nutzung von V2X GLOSA-Systemen die Nutzung von Smartphones als Empfangseinheit implementiert werden. Nachdem die Informationen über die Sensoren aufgenommen und aufbereitet wurden um diese im Standardformat an die RSU zu übermitteln, kann die SPaT. Nach Erhalt der standardisierten Nachrichten SPaT und MAP kann das Fahrzeug basierend auf der aktuellen Position den Abstand bis zur Kreuzung bestimmen und basierend darauf berechnen, ob eine Überquerung in der aktuellen Grünphase noch möglich ist oder ob die Entfernung zu groß ist. Sollte eine Überquerung in der aktuellen Grünphase möglich sein, so wird dem Fahrer hierfür eine Geschwindigkeitsempfehlung gegeben. Sollte dies jedoch nicht möglich sein wird dies dem Fahrer mitgeteilt. Hier gibt es basierend auf der Entfernung erneute mehrere Optionen: Die erste Option ist, wenn das Fahrzeug zu nah an der Kreuzung ist, um mit einem ausrollen die Dauer bis zum Beginn der nächsten Grünphase zu überbrücken. Hier ist ein Halt unvermeidbar. Die zweite Option ist, dass das Fahrzeug aufgrund seiner großen Distanz zur Kreuzung die anstehende Rotphase durch ausrollen überbrücken kann und rechtzeitig zum Beginn der Grünphase an der Kreuzung ankommt. Um dies zu ermöglichen wird hierfür dem Fahrer eine Geschwindigkeitsempfehlung gegeben. In Abbildung 6 ist die Darstellung von zwei Optionen in einer Smartphone-Anwendung sichtbar. In der linken Abbildung muss zum Erreichen der nächsten Grünphase eine Geschwindigkeit zwischen 10 und 14 km/h eingehalten werden. Da das Fahrzeug die obere Grenze derzeit um 3 km/h übersteigt wird das optimale Erreichen der Kreuzung nicht gelingen, weshalb die Anwendung dies mit einem roten Balken signalisiert. Im rechten Beispiel befindet sich die Fahrzeuggeschwindigkeit in den bestimmten Grenzen, weshalb dies mit einem grünen Balken signalisiert wird.

Gemeinsam mit dem Tiefbauamt Halle konnte eine geeignete Pilotstrecke ausgewählt werden, welche in Abbildung 7 dargestellt ist. Es handelt sich hierbei um fünf aufeinander folgende stark befahrende Kreuzungen, um einen möglichst großen Grüne-Welle-Effekt erzeugen zu

können. Des Weiteren werden die Kreuzungen mit Radarsensoren ausgestattet, um eine Aussage über die Auswirkungen der GLOSA-Empfehlungen ableiten zu können. Mit den aufgenommenen Daten werden abschließend Verkehrssimulationen durchgeführt, um eine Aussage über Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen treffen zu können. Hierbei wird eine Reduzierung der Abbrems- und Anfahrvorgänge erwartet, was zu einer Reduzierung des Energieverbrauchst der Fahrzeuge zur Folge hat. Im späteren Verlauf des Projektes TalkToMe wird zudem die Übertragung von Staumeldungen über die RSU an der Pilotstrecke implementiert.

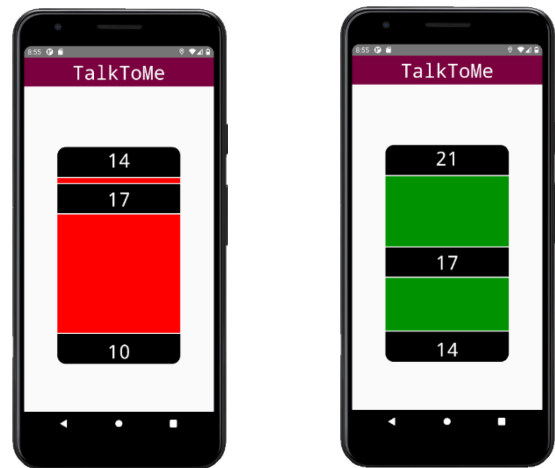


Abbildung 6: Darstellung des GLOSA auf dem Smartphone im Projekt TalkToMe.

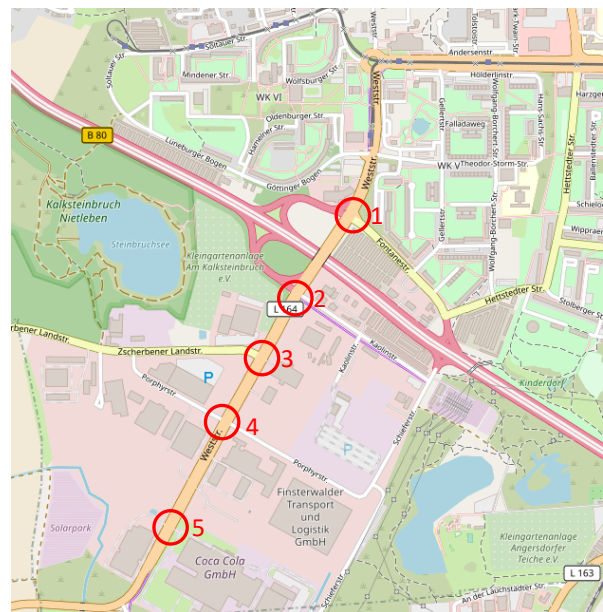


Abbildung 7: Pilotstrecke in Halle (Saale) des Projektes TalkToMe

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dieser Arbeit wurde ein Konzept vorgestellt, welches ein GLOSA-System ohne Datenverbindung zu einem LSA-Controller realisieren kann. Gelöst wird dies durch die Verwendung/Einbringung von optischen Sensoren, welche eine Aufnahme der aktuellen Phasen von Signalgebern aufnehmen können. Das hier beschriebene Konzept hat das Potential mit geringen Kosten die Akzeptanz von RSU-Anbringungen zu erhöhen.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil ist, dass Kommunen ein solches System unabhängig von Zuarbeit der Lichtsignalanlagenhersteller, welche eine Anbindung der RSU an den LSA-Controller zunächst realisieren müssen, sind. So kann zudem schneller agiert und umgesetzt werden. Dank der Kooperation mit dem Tiefbauamt Halle (Saale) ist es zudem möglich das konzipierte System unter realen Verkehrsbedingungen mit vorhandener Infrastruktur zu testen und daraus Handlungsempfehlung abzuleiten. Im Zuge des Pilotbetriebs ist es notwendig die Robustheit des Systems zu untersuchen, zu bewerten und ggf. Anpassungen am Design vorzunehmen. Für die Zukunft wäre eine Erweiterung bzgl. der Einbindung von Daten eines Verkehrsleitrechners möglich, welche die vorhandenen Informationen erweitert.

FÖRDERHINWEIS UND DANKSAGUNG

Die Inhalte und Ergebnisse dieses Beitrages entstammen der Förderung von Vorhaben der Forschung, Einführung und Nutzung intelligenter Verkehrssysteme aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE). Kennziffer: 307.4.3-32323/1915003001



SACHSEN-ANHALT



EUROPÄISCHE UNION
EFRE
 Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

LITERATUR

[BMU21a] BMU; *Treibhausgasemissionen sinken 2020 um 8,7 Prozent*, 16.03.2021.

[BMU21b] BMU; *Der Klimaschutzplan 2050 – Die deutsche Klimaschutzlangfriststrategie*, 2021. Abgerufen am 08.04.2021.

[BMV11] BMVI; *Elektromobilität – Deutschland als Leitmarkt und Leitanbieter*, 2011.

[Eck13] Eckhoff, David; Halmos, Bastian; German, Reinhard; *Potentials and Limitations of Green Light Optimal Speed Advisory Systems*, in: 2013 IEEE Vehicular Networking Conference, 2013, S. 103–110.

[Kat11] Katsaros, Konstantinos; Kernchen, Ralf; Dianati, Mehrdad; Rieck, David; *Performance study of a Green Light Optimized Speed Advisory (GLOSA) application using an integrated cooperative ITS simulation platform*, 2011, S. 918–923.

[Kra21] Kraftfahrt-Bundesamt; *Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Bundesländern, Fahrzeugklassen und ausgewählten Merkmalen, 1. Januar 2021*, 01.01.2021.

[Leb15] Lebre, Marie-Ange; Le Mouël, Frédéric; Ménard, Eric; Garnault, Alexandre; Bradaï, Benazouz; Picron, Vanessa; *Real Scenario and simulations on GLOSA traffic light system for reduced CO2 emissions, waiting time and travel time*, in: 22nd ITS World Congress, 2015.

[Miu19] Miucic, Radovan; *Connected Vehicles*, Cham. Springer International Publishing, 2019.

[SAE20] SAE International; *Candidate Improvements to Dedicated Short Range Communications (DSRC) Message Set Dictionary*, 202010. Auflage, 06.01.2020, https://www.sae.org/standards/content/j3067_202010/. Abgerufen am 26.07.2021.

[Ser13] Seredynski, Marcin; Dorronsoro, Bernabe; Khadraoui, Djamel; *Comparison of Green Light Optimal Speed Advisory approaches*, in: , *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)*, IEEE, 06.10.2013 - 09.10.2013, S. 2187–2192.

[Sta17] Stahlmann, Rainer; Möller, Malte; Brauer, Alexej; German, Reinhard; Eckhoff, David; *Exploring GLOSA Systems in the Field: Technical Evaluation and Results*, 2017.

[Tie10] Tielert, Tessa; Killat, Moritz; Hartenstein, Hannes; Luz, Raphael; Hausberger, Stefan; Benz, Thomas; *The impact of traffic-light-to-vehicle communication on fuel consumption and emissions*, 2010, S. 1–8.

[Wol19] Wolf, Joerg Christian; Ma, Jingtao; Ciso, Bill; Neill, Justin; Moen, Brian; *Deriving Signal Performance Metrics from Large-Scale Connected Vehicle System Deployment*, 2019.

Tony Glimm, M.Sc., Research Assistant at the Institute of Logistics and Material Handling Systems (ILM), University Magdeburg “Otto-von-Guericke”.
E-Mail: tony.glimm@ovgu.de

Univ-Prof. Dr.-Ing. Hartmut Zadek, Institute of Logistics and Material Handling Systems (ILM), University Magdeburg “Otto-von-Guericke”.
E-Mail: zadek@ovgu.de

Address: Institute of Logistics and Material Handling Systems (ILM), University Magdeburg “Otto-von-Guericke”,
Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg