

LOGIN - Lichtsignalanlagen optimal gesteuert im Nahverkehr

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

FKZ 45AVF2005A-H
(ehemals FKZ 01MM20006)

AVF – automatisiertes und vernetztes Fahren (BMV)



**Verbund-
Abschlussbericht**
01.12.2020 – 31.05.2024

Konsortialleitung		
ÜSTRA Hannoversche Verkehrsbetriebe AG		
Projektleiter der Konsortialleitung		
Thomas Wrubel	Tel.:	+49 511 1668 0
	Email:	login-hannover@uestra.de
Laufzeit des Vorhabens	von: 01.12.2020	bis: 31.05.2024
Berichtszeitraum	von: 01.12.2020	bis: 31.05.2024
Berichtsdatum	31.07.2024	

I. Projektübersicht

a) Projektbeschreibung und Zielsetzung

Die international abgestimmte regulatorische Umnutzung von Funkfrequenzbändern gefährdet die heutige analoge Kommunikationsgrundlage für die Bevorrechtigung des ÖPNV an Lichtsignalanlagen (LSA). Da aktuelle Signalprogramme eine haltvermeidende Freigabe für den ÖPNV bei konkurrierenden Anmeldungen nicht immer garantieren können, ist für ein energie- und emissionsminimales Fahren aus Klimaschutzgründen die vorausschauende Übertragung von LSA-Schaltzeitpunkten an das Fahrpersonal oder an zukünftige fahrerlose Fahrzeuge notwendig. Diese Probleme sollen durch V2I-Kommunikationstechnologien nach ETSI ITS-G5 und ISO/TS 19091 gelöst werden. Erste Projekte haben die Machbarkeit bestätigt, aber auch neue Herausforderungen wie Datensicherheit, Verlässlichkeit von Schaltzeitprognosen und die Integration in bestehende Systeme aufgezeigt. Dies stellt Kommunen und ÖPNV-Unternehmen vor große Herausforderungen.

Zur schrittweisen Lösung dieser Probleme verfolgt LOGIN die Entwicklung und Erprobung eines modularen Baukastens, der auf allen Ebenen (Planung, Entwurf, Piloterprobung und Regelbetrieb) Lösungen und Instrumente bereitstellt. Dies ermöglicht es LSA- und ÖPNV-Betreibern, die bestgeeigneten Komponenten schrittweise zu implementieren und unter Praxisbedingungen zu testen. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten finden in der Region Hannover mit den ÖPNV-Unternehmen ÜSTRA und regiobus statt.

Obwohl nicht im Fokus, können grundsätzlich alle mit ITS-G5 ausgerüsteten Fahrzeuge von den Projektergebnissen profitieren. Alle Projektpartner können die Ergebnisse gewinnbringend nutzen: Die Region Hannover sichert die Zukunft der ÖPNV-Bevorrechtigung und leistet damit einen Beitrag zum Klimaschutz. Industriepartner erweitern ihr Produktportfolio um LOGIN-Komponenten, die aufgrund ihrer Übertragbarkeit auf andere Städte und Kommunen einen hohen Bedarf erwarten lassen. Die Universität Kassel erwartet neue methodische Erkenntnisse zu bisher ungelösten Forschungsfragen.

Das Vorhaben zielt auf die Entwicklung und Erprobung einer modularen Nachfolgesystemwelt auf Basis des digitalen V2X-Kommunikationsstandards ITS-G5 zur Ablösung der analogen ÖPNV-Beschleunigungssysteme ab. Durch Modularisierung wird eine schnelle Übertragbarkeit auf andere Städte und ländliche Gebiete gewährleistet. Künstliche Intelligenz soll zuverlässige Schaltzeitprognosen unter Nutzung von a-priori Wissen des ÖPNV-Betriebs liefern. Diese Informationen werden dem Fahrpersonal über eine skalierbare Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI) angezeigt. Nach simulationsgestützter Vorerprobung und Analyse potenzieller Wirkungen auf Sicherheit, Umwelt und Verkehr werden die entwickelten Systemkomponenten im öffentlichen Straßenraum unter realen Bedingungen getestet. Ein auf den ÖPNV zugeschnittenes Signierungsverfahren soll die Datensicherheit gewährleisten. Aus den Erfahrungen des Pilotbetriebs

wird eine Einführungsstrategie für den Regelbetrieb abgeleitet und ein Leitfaden für andere Kommunen erstellt.

Die technologische Ausgangssituation in Hannover ist bei Stadtbahnen und Bussen unterschiedlich und muss bei der Einführung von C-ITS differenziert behandelt werden. Das zu entwickelnde und zu erprobende kooperative System ist aufgrund der Vielzahl seiner Komponenten sehr komplex und erfordert eine gut abgestimmte Kooperation zwischen ÖV-Fahrzeugen und verkehrstechnischer Infrastruktur. Es fehlen geeignete Signalisierungs- und Fahrstrategien, insbesondere zuverlässige Schaltzeitprognosen. Vernetzte Verkehrstechniksysteme sind räumlich und funktional stark verteilt und müssen in Echtzeit koordiniert werden, was den Entwurf verteilter Softwarekomponenten zu einer großen Herausforderung macht. Es gibt bisher kaum Erfahrungen mit kooperativen verkehrstechnischen Systemen, an denen mehr als ein Betreiber von Lichtsignalanlagen und mehr als ein Verkehrsunternehmen beteiligt sind.

Das LOGIN-Vorhaben verfolgt mehrere Ziele. Zunächst soll ein modulares On-Board-Equipment (OBE) entwickelt und erprobt werden, das für bidirektional wirkende C-ITS-Funktionen zur ÖPNV-Bevorrechtigung an Lichtsignalanlagen (LSA) sowie als Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI) zum Fahrpersonal dient. Bis zum Projektende ist die Ausrüstung von etwa 40 Stadtbahnen und Bussen vorgesehen.

Weiterhin umfasst das Projekt die Ausstattung von Lichtsignalanlagen auf vier Teststrecken in Hannover mit Roadside Units (RSU), um den V2I-Datenaustausch zwischen ÖV-Fahrzeugen und LSA zu ermöglichen. Hierfür ist geplant, bis zum Projektende etwa 18 Knotenpunkte auszustatten.

Ein weiteres Ziel ist die Entwicklung neuartiger Signalisierungs- und Fahrstrategien. Diese Strategien sollen Freigabeentscheidungen für ÖV-Fahrzeuge auf Grundlage kontinuierlicher Fahrzeugpositionen und Ankunftszeitprognosen treffen. Schließlich soll die Qualität der Schaltzeitprognosen durch die Kombination zentraler und lokaler Verfahren sowie die Nutzung prognosefreundlicher Signalprogramme erheblich verbessert werden.

Der Lösungsansatz umfasst eine Grundlagenermittlung und die Formulierung von Anforderungen, Anwendungsfällen und Architekturvarianten. Während die OBU die Kommunikation zwischen Fahrzeug und LSA abwickelt, übernimmt ein mobiles Endgerät, vorzugsweise ein Smartphone, weitere informations- und datentechnische Aufgaben. Eine simulationsbasierte Testumgebung erleichtert die Entwicklung und Funktionsprüfung von Softwaremodulen und die Analyse der verkehrlichen Wirkungen. Eine Evaluation ermittelt zunächst simulationsbasiert die verkehrlichen Potenziale und dann empirisch die Qualität der entwickelten Verfahren und die Stabilität des Gesamtsystems.

Das Vorhaben ist ambitioniert, aber die Partner bringen umfassende Erfahrungen aus vorhergehenden Forschungsvorhaben ein. Technologische Risiken sind unterschiedlich verteilt: Während die V2X-Kommunikation gut beherrschbar ist, bergen system- und verfahrenstechnische Entwicklungen höhere Risiken. Der modulare Ansatz erhöht die Beherrschbarkeit des Systems, indem Lösungen schrittweise umgesetzt und getestet werden. Das LOGIN-Projekt baut auf bestehenden internationalen Standards auf, was die Umsetzungssicherheit und Übertragbarkeit erhöhen. Datenschutzprobleme werden nicht erwartet, da die Überwachung von ÖV-Fahrzeugen durch ITCS-Systeme gängige Praxis ist. Die Bevorrechtigung des ÖPNV an Lichtsignalanlagen ist ein anerkanntes Konzept zur Attraktivitätssteigerung des ÖPNV.

b) Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben baute mit seinen Umsetzungen auf erste abgeschlossene C-ITS Projekte im Themenfeld der ÖV-Bevorrechtigung mit Testgebieten auf. Die bisherigen Umsetzungen basierten überwiegend auf C-ITS Nachrichtentypen, welche nur die in R09-Telegrammen verwendeten Informationen übertrugen, oder es wurden für die LSA-Steuerungen, die übertragen Informationen auf bestehende Meldekettens zurückgerechnet. Die eigentliche Potenziale der C-ITS Technologie konnten somit noch nicht in den Testgebieten genutzt werden. Hier knüpft das Projekt LOGIN an und hat sich zum Ziel gesetzt fehlenden Bausteine zu entwickeln damit die Informationskette von Fahrdienst-Mitarbeitenden eines Verkehrsunternehmens, bis zum LSA-Planer für die Erstellung der Steuerungslogik genutzt werden kann.

In der Projektlaufzeit ergaben sich Herausforderungen, die vor Durchführung des Vorhabens noch nicht absehbar waren. Diese reichten von langfristigen Abwesenheiten der mit der Umsetzung des Projektes beauftragten Personen, über die zum Zeitpunkt des Projektantrages noch nicht absehbaren langwierigen Folgen der Corona-Pandemie, bis hin zu einer schwerwiegenden Cyber-Attacke, die die ÜSTRA im Frühjahr 2023 traf.

Corona-Pandemie: Entgegen ersten Annahmen normalisierte sich die Lage nach dem ersten "Lockdown" im März 2020 noch nicht und es folgten weitere Infektionswellen. Zunächst schränkten staatliche Maßnahmen wie die erlassenen Kontaktverbote und die Homeofficepflicht die Arbeiten im Projekt ein. Nachdem zwischenzeitlich auf digitale Kommunikationsmedien zurückgegriffen werden musste, wurde erst im 19. Projektmonat durch lokale Lockerungen der Auflagen ein Projekttreffen im gesamten Konsortium möglich. Durch heruntergefahrte Produktionen und außer Takt geratene Lieferketten folgte mit der umgangssprachlich als "Chip-Krise" bezeichneten Verknappung von Elektronischen Bauteilen eine weitere Herausforderung für das Projekt.

Fachkräftemangel: In den vergangenen Jahren hat sich resultierend aus dem demografischen Wandel die Situation ergeben, dass ausgeschriebene Stellen gar nicht oder nur verzögert mangels Bewerber*innen besetzt werden können. Zugleich scheiden Mitarbeitende mit langjährig

aufgebautem Fachwissen aus den Unternehmen aus. Dies hatte ebenfalls Auswirkungen auf die für die Bearbeitung des Vorhabens verfügbaren personellen Ressourcen.

Cyberattacke ÜSTRA: Etwa ein Jahr vor dem Projektabschluss wurde die ÜSTRA Opfer einer schwerwiegenden Cyberattacke. Nachdem zunächst von einem vollständigen Datenverlust ausgegangen werden musste, konnten in den folgenden Monaten Teile der Daten und IT-Infrastruktur wiederhergestellt werden. Da sich die Wiederherstellung zunächst auf die Aufrechterhaltung des Betriebes fokussierten, standen Kapazitäten für Projektumsetzungen nicht wie geplant zu Verfügung. Es wurde versucht den entstandenen Verzug im Rahmen der Laufzeitverlängerung aufzuholen.

Als Reaktion auf die benannten externen Einflüsse wurden wie folgend unter II. beschrieben Gegenmaßnahmen zu entstanden Verzögerungen geplant und umgesetzt.

c) Planung und Ablauf des Vorhabens

In der Planung des Vorhabens wurde für den Ablauf eine Unterteilung in die Arbeitsfelder Fahrzeugseitige Ausrüstungen, Infrastrukturseitige Ausrüstungen und Verfahrensentwicklung. Zudem wurde eine Unterteilung in Arbeitspakete mit einer jeweilig zuständigen Arbeitspaketleitung vorgenommen.

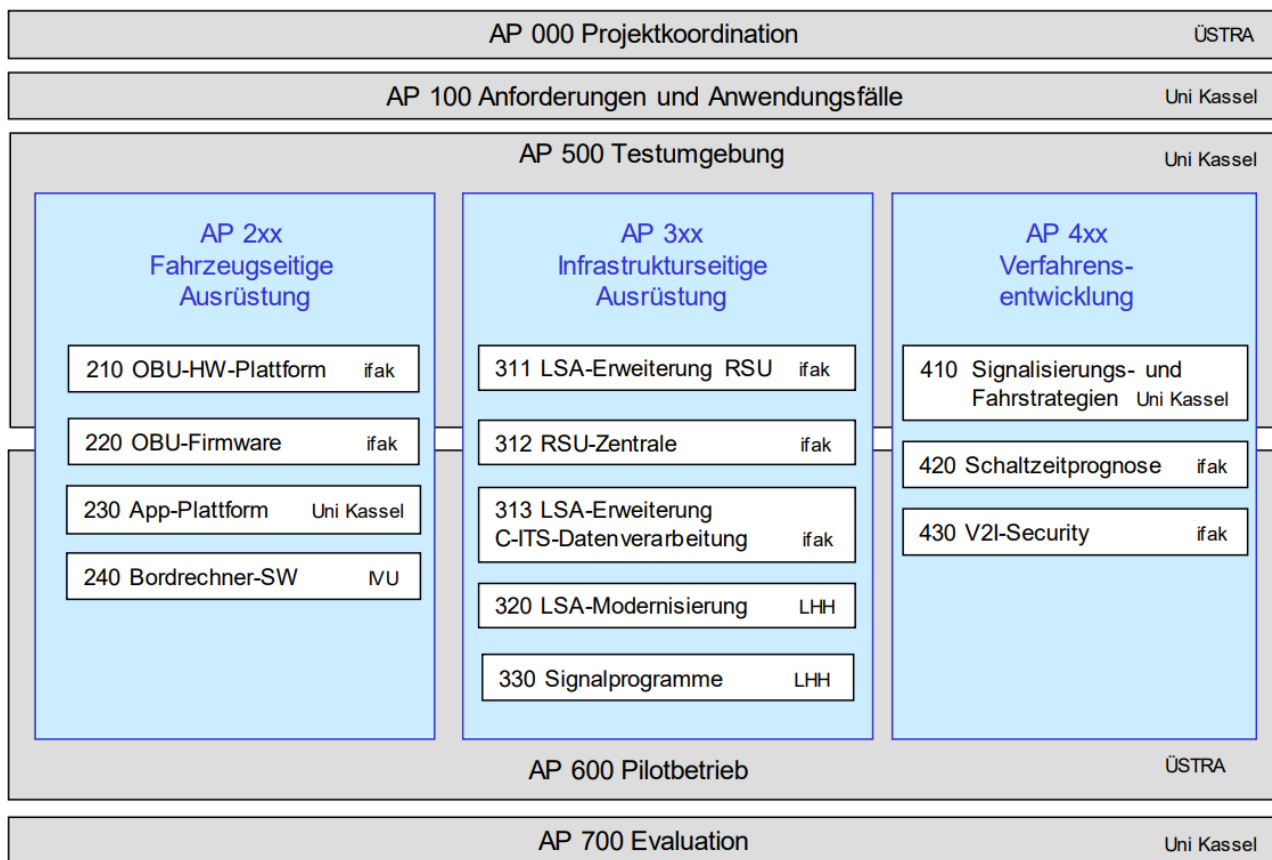


Abbildung 1: Übersicht und Unterteilung der Arbeitspakete

Im AP 100 wurden zunächst die Anforderungen an die Systemkomponenten und -architektur anhand von Anwendungsfällen festgelegt. Die Arbeitsergebnisse der drei AP-Gruppen AP-2XX, AP3XX und AP4XX wurden zunächst in Prototypen-Tests oder einer simulationsgestützten Testumgebung getestet, bevor sie in den Pilotbetrieb des AP 600 eingebracht und erprobt wurden. Das AP 700 befasste sich schließlich mit der Evaluation der gewonnenen Daten aus dem Pilotbetrieb.

Für die Dokumentation erreichter Zwischenziele wurden Meilensteine im Projektablauf vorgesehen. Der erste Meilenstein stellt den Abschluss der Detailplanungsphase dar und mündete in der Dokumentation der Ergebnisse in einem Meilensteinbericht. Der zweite Meilenstein stellt die Prototypische Umsetzung und den Austausch erster C-ITS Nachrichten dar. Abschließend beinhaltet der dritte Meilenstein die Funktion des Gesamtsystems auf Fahrzeug- und Infrastrukturseite der Nachweis erfolgt über die Dokumentation der erfolgten Priorisierung eines ÖV-Fahrzeuges im Regelbetrieb.

Ms.-Nr.	Monat	Ziel
M1	9	Grobspezifikation ist dokumentiert.
M2	18	Prototypen von OBU und RSU sind an einem Beispielknoten betriebsbereit.
M3	27	Gesamtsystem ermöglicht erste Feldmessungen.

Tabelle 1: Übersicht Meilensteine

Detailliertere Beschreibungen der Planungen für das Vorhaben der Projektpartner können den jeweiligen Teilvorhabenabschlussberichten entnommen werden.

d) Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Da ein komplexer Systemansatz verfolgt wird, ist eine Vielzahl von Themenbereichen berührt. Stellvertretend seien genannt: Lichtsignalsteuerung, V2X-Kommunikation, Schaltzeitprognose, Künstliche Intelligenz und Datensicherheit. Die ÖPNV-Bevorrechtigung an signalisierten Knotenpunkten beruht zum großen Teil auf einem seit mehr als 30 Jahren eingesetzten Verfahren, bei dem sich ÖV-Fahrzeuge an üblicherweise zwei festgelegten Positionen mittels standardisierter R09/xx-Funktelegramme an einer LSA anmelden und nach Überquerung des Knotenpunktes abmelden. Dieses Verfahren hat den Nachteil, dass zwischen den Meldepunkten keine Informationen zum weiteren Fahrtverlauf der ÖV-Fahrzeuge vorliegen. Eine echte Prognose der Ankunftszeit der Fahrzeuge an der Haltlinie und somit eine in jedem Fall situationsgerechte ÖV-Freigabe ist daher nicht möglich. Ersatzweise werden die Erwartungswerte der Fahrzeit zwischen den Meldepunkten und der Haltlinie (Haltestelle nach Knotenpunkt) fest in den LSA-Steuerungen hinterlegt. Das Fahrpersonal kann zuweilen nicht nachvollziehen, ob die eigene Anmeldung funktioniert hat oder ein Auffahren auf Rot einem ungünstigen Anforderungszeitpunkt im Umlauf geschuldet ist. In einigen Städten angezeigte „A-Zeichen“ der LSA könnten auch von nachfolgenden ÖV-Fahrzeugen ausgelöst worden sein.

Die Datenkommunikation besteht nur in eine Richtung, vom Fahrzeug zur LSA. Für ein wünschenswertes energieeffizientes Fahren fehlt der Rückkanal zur Übertragung von LSA-Schaltzeitpunkten zum Fahrpersonal.

Neben diesen funktionalen Aspekten zeichnet sich der aktuelle Stand der Technik dadurch aus, dass sich der Lebenszyklus der analogfunkbasierten Bake-Funk-Systeme bzw. GNNS-Funk-Systeme dem Ende zuneigt, was mit einem zunehmenden Ersatzteilmangel und Handlungsbedarf verbunden ist. Schließlich droht mit der Umnutzung von Analogfunkfrequenzen die technologische Grundlage der ÖPNV-Beschleunigung wegzufallen. Digitale Betriebsfunksysteme wie z. B. TETRA oder DMR sind nicht überall wirtschaftlich umsetzbar und daher oft keine Alternative. Die ausschließliche Nutzung von 4G-Mobilfunknetzen als weitere Option gilt bei ÖPNV-Unternehmen als wenig praktikabel, weil die Verfügbarkeit und Übertragungsqualität nicht durchgehend garantiert werden können, insbesondere nicht im ländlichen Raum. Dies steht auch für 5G-Netze zu befürchten.

Die Zukunftssicherung der ÖPNV-Beschleunigung durch den Einsatz von ITS-G5 war bzw. ist Gegenstand mehrerer nationaler Forschungsprojekte. Stellvertretend seien die abgeschlossenen Vorhaben VERONIKA und BIDIMOVE genannt. Als Vorgängerprojekte, bei denen unabhängig vom ÖPNV die V2X-Kommunikation im Zusammenhang mit kooperativen LSA im Mittelpunkt stand, gelten z. B. UR:BAN, AKTIV, KOLINE, SIRENE und der deutsche V2X-Feldversuch simTD.

Für die Umsetzung der ITS-G5 gestützten Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur in Hannover wurde von den Normierungen SAE-J2735 und ISO 19091 ausgegangen. Es wurden Anpassungen durchgeführt, welche auf die europäischen Übereinkünfte des Vorhabens C-ROADS zurückzuführen sind. Im Speziellen wurde der technische Stand aus C-ROADS für folgende Teilbereiche übernommen:

- Bestimmung der anzuwendenden C-ITS Nachrichtentypen (SREM, SSEM, SPATEM, MAPEM, CAM)
- Spezifikation der Nachrichteninhalte
- Spezifikation des Übertragungsvorgangs zwischen OBU und RSU

Auf der Fahrzeugseite erfolgte die Bereitstellung von Daten durch den Bordrechner der IVU für die Projektpartner mittels der Dienste von IBIS-IP, die in den entsprechenden VDV-Schriften und -Dokumenten unterhalb der Nummer 301 dokumentiert sind.

Im Bereich der Berechnungsverfahren des Ankunftszeitpunktes des ÖV-Fahrzeuges an der Haltlinie (estimated time of arrival – ETA) sowie Fahrstrategien wurde an die bisherigen Erfahrungen und Entwicklungen im Fachgebiet Verkehrstechnik und Transportlogistik der Universität Kassel angeknüpft. Diese betreffen im Wesentlichen die vorangegangenen Entwicklungen in den Projekten „VERONIKA“, „UR:BAN“ und „HERCULES“. Für die Bestimmung der ETA-Berechnungsverfahren

mit künstlicher Intelligenz wurde unter anderem das bekannte Extreme Gradient Boosting Verfahren „XGBoost“ verwendet.

Im Falle der Schaltzeitprognose wurde an dem bestehenden Stand der Technik und dem Modul PREDICT des VTmanagers der Firma GEVAS angeknüpft. Dieses Modul berechnet die Schaltzeitprognose und kann das zukünftige Signalbild von verkehrabhängigen LSA mit hoher Wahrscheinlichkeit vorhersagen. Die Schaltzeitprognose setzt dabei verschiedene sogenannte Schätzer (Predictor) ein, die je nach Grad der Verkehrsabhängigkeit der LSA ausgewählt werden und eine sekundenfeine Wahrscheinlichkeitsverteilung zum erwarteten Signalbild liefern. Das Modul PREDICT setzt Klassifikations- bzw. KI-Verfahren ein, die versuchen Muster in einer großen Menge an historischen Eingangsdaten zu erkennen und diese Muster in bestimmte Klassen zu unterteilen.

Die Schaltzeitprognose berechnet auf Basis der Eingangsdaten des aktuellen Zeitschritts, der aktuellen Signalbilder, ggf. AP-Werte sowie der angelernten Muster das Schaltverhalten für einen bestimmten Zeithorizont. Dabei ist zu berücksichtigen, dass mit steigendem zeitlichem Abstand zu einem zukünftigen Schaltzeitpunkt (Prognosehorizont), die Prognosesicherheit abnimmt. Dies liegt unter anderem in den potenziellen neuen Eingangsdaten im Prognosezeitraum begründet, die ein verändertes Schaltverhalten bewirken können.

Die folgende Abbildung 2 zeigt die Komponenten und den Systemaufbau der Schaltzeitprognose. Das darin dargestellte Modul PREDICT besteht im Wesentlichen aus zwei Hauptbestandteilen. Das Analyse-Modul (TDA bzw. auch VTanalyzer) sammelt alle aktuellen LSA-Eingangsdaten über einen langen Zeitraum in einer Datenbank und trainiert mit diesen die Baumschätzer (Predictor 1 bis n) einmal täglich an. Darüber hinaus sind umfangreiche Auswertungen möglich, wie unter anderem die Bewertung der Prognosegüte. Eine Nutzeroberfläche (UI) stellt die Ergebnisse der Auswertungen zur Verfügung. Mit dem zweiten Modul der sogenannten Signal State Prediction (SSP) werden mit den aktuellen LSA-Eingangsdaten und den trainierten Schätzern aktuelle Prognosen für alle Signalgruppen berechnet. Auch zu diesem Modul gibt es zur Überwachung eine Nutzeroberfläche (UI). Aufgrund der vielfältigen Aufgaben wurde das Gesamtsystem auf verschiedene Hardwareressourcen verteilt. Die Komponenten kommunizieren mit den städtischen Systemen über offene Schnittstellen und Datenstandards (OCIT).

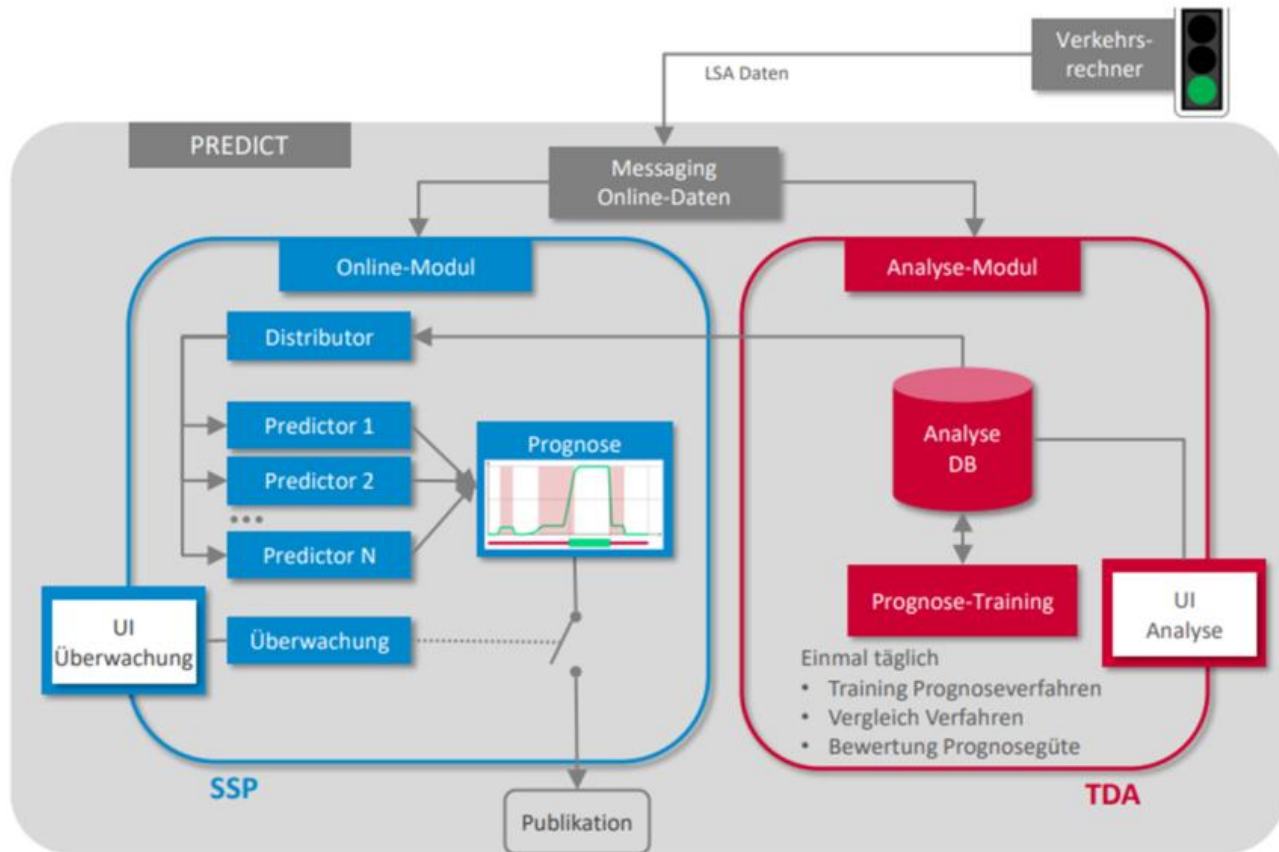


Abbildung 2: Copyright „Gevas software GmbH“

e) Aktueller Stand der Wissenschaft und Technik während der Durchführung des Vorhabens

Während der Durchführung des Projektes wurde unter anderem durch andere Projekte des Förderaufrufes „Automatisiertes und vernetztes Fahren“ (AVF-Projekte) mit einem früheren Projektende Ergebnisse bekannt. Hierdurch rückte unter anderem die Datensicherheit stärker in den Fokus des Projektes. Entgegen der in der Vorhabenplanung vorgesehenen Absicherung mit selbstsignierten Zertifikaten wurde die Notwendigkeit einer Public Key Infrastruktur (PKI) deutlich. Ein weiteres Themenfeld waren die Ergebnisse zu latenzbedingten Einflüssen auf die Verarbeitung von Prognosen aus zentralenbasierten Ansätzen. Das Vorhaben wurde hierdurch jedoch nur im Bereich der Schaltzeitprognosen tangiert, da ansonsten dezentrale Prognoseverfahren eingesetzt wurden.

BiDiMoVe

Eine inhaltliche Anknüpfung mit Bezug auf die Anwendung der C-ITS Technologie im Bereich des ÖPNV bestand zum dem am 24.9.2021 in der Hansestadt Hamburg erfolgreich abgeschlossen AVF-Projekt BiDiMoVe „Bidirektionale Multimodale Vernetzung“. Von dem im Projekt BiDiMoVe erarbeiteten Stand der Wissenschaft und Technik konnten auch im Projekt LOGIN wichtige Erkenntnisse und Erfahrungen aus Arbeitsschwerpunkten, besonders des Entwurfs und der

Entwicklung von On-Board-Units zur Fahrzeug-/Infrastruktur-Kommunikation (V2X), der Anwendungsentwicklung sowie der PKI-Implementation genutzt werden. Weitere Erkenntnisse und Erfahrungen in Bezug auf den Umfang der notwendigen Zertifizierungen von OBU, die für den Einsatz in Fahrzeugen des ÖPNV vorgesehen sind, insbesondere in Bezug auf Brandschutz und elektromagnetische Verträglichkeit, wurden während des Zeitraums der teilweise parallelen Projektlaufzeiten zwischen beiden Projekten ausgetauscht.

KoMoDnext – Automatisiertes Fahren im digitalen Testfeld Düsseldorf

Innerhalb KoMoDNext wurden von SWARCO/Schlothauer & Wauer das Konzept des Vehicle Buffers geboren, der eine direkte und lokale Kommunikation zwischen RSU und der verkehrstechnischen Logik in den LSA-Steuergeräten ermöglicht. In dieser ersten Konzeption ging es ausschließlich um die Weitergabe der Inhalte der CAM z.B. Fahrzeugposition und R09-basierte Priorisierung über CAM. Auf diesen Vorarbeiten konnte innerhalb LOGIN nahtlos aufgesetzt werden.

Wie im Vorhaben LOGIN vorgesehen haben auch andere Institutionen, die Bundesanstalt für Straßenwesen und der Verband deutscher Verkehrsunternehmen, Leitfäden zu der Einführung von C-ITS Diensten an Lichtsignalanlagen. Ein wesentlicher Bestandteil ist die Empfehlung eines mehrstufigen Umsetzungspfades. Durch den zeitlich gesetzten Rahmen des Vorhabens sowie dem Fokus auf Forschungen zu einem Signal Request Extended Message (SREM) basierten Priorisierungsverfahren, erfolgte nur eine Bestätigung der technischen Machbarkeit durch den Austausch der verwendeten C-ITS-Nachrichten der Priorisierung mittel CAM-R09 bzw. SREM-R09. Zudem sei an dieser Stelle angemerkt, dass durch die reine Übertragung der Informationen aus den R09-Telegrammen in C-ITS Nachrichten die eigentlichen Potenziale einer C-ITS basierten ÖV-Priorisierung nicht genutzt werden können.

f) Zusammenarbeit mit weiteren externen Stellen außerhalb des Konsortiums

Im Rahmen der Zusammenarbeit mit externen Stellen außerhalb des Konsortiums gab es einen fachlichen Austausch mit den Projektleitern des Projekts „VERONIKA“ der Stadt Kassel. Dabei wurde das Projekt „VERONIKA“ vorgestellt und es gab einen Einblick in die technische Umsetzung und die Übertragbarkeit im Vorfeld des Projekts LOGIN wurde geprüft. Des Weiteren hat ein Austausch bezüglich einer herstellerunabhängigen Schnittstelle zwischen Steuergerät und RSU mit der Firma SAD stattgefunden. Zudem seien hier die Beteiligungen in Arbeitsgruppen des Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) und das Mitwirken in der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) genannt. Außerdem wurde die bereits bestehende Mitgliedschaft im ITS mobility e.V. für den fachlichen Wissensaustausch genutzt. Auch der direkte Austausch mit anderen Verkehrsunternehmen wurde für den Wissensgewinn genutzt. Hierzu gab es beispielweise Gespräche mit der Kasseler Verkehrs-Gesellschaft Aktiengesellschaft (KVG), der Hamburger Hochbahn AG sowie den Berliner Verkehrsbetrieben (BVG).

Im Verlauf der Projektbearbeitung wurde bezüglich der sicheren V2I-Kommunikation zwischen den verschiedenen ITS-Stationen (PKI) mit der Autobahn-GmbH und der Freien Hansestadt Hamburg Kontakt aufgenommen. Daraus resultierte, dass das Projekt LOGIN die bereits vorhandene und betriebene Pilot-PKI des LSBG (HH) nutzen konnte. Eine Nutzungsvereinbarung über einen Zeitraum von 4,5 Jahren wurde zwischen der Freien und Hansestadt Hamburg, der Region Hannover und der Landeshauptstadt Hannover abgeschlossen, um den Ausbau kooperativer Infrastruktur für C-ITS-Nachrichten sowie den Dialog zwischen den Kommunen zu fördern. Zudem wurde im Vorhaben auf einen externen Dienstleister zurückgegriffen. Um eine zusätzliche Expertise zu sicherheitsrelevanten Maßnahmen in der Datenübertagung und für die Bewertung möglicher Angriffsszenarien auf die im Projekt geschaffene Systemarchitektur der Informationstechnik zu erhalten.

II. Verwendung der Zuwendung, Durchführung und Ergebnis des Vorhabens

a) Übersicht des Projektverlaufs

AP000: Projektkoordination (Leitung: ÜSTRA)

Präsentation im Internet: Es wurde die Erstellung und das Hosting einer Projekthomepage beauftragt, das Forschungsprojekt wird seit 2022 im Internet zu präsentieren. Veröffentlichung aus dem Konsortium wurden bereitgestellt. Über Meilensteine informiert, teilweise auch in Form von Pressemitteilungen.

Gesellschaftlicher Dialog: Das Projekt wurde bei mehreren Veranstaltungen durch Mitarbeitende der ÜSTRA sowie Promotoren präsentiert. Exemplarisch seien hier die Europäische Mobilitätswoche oder der Tag der Niedersachsen genannt. Bei dem Tag der Niedersachsen als landesweitem Event mit über 200 Ausstellenden und rund 500.000 Besuchern wurde das Projekt mit einem der später ausgestatteten Elektrobusse präsentiert und der Dialog gesucht. Das Angebot bot dabei Platz zum Verweilen, Erfahrungen mit der aktuellen Priorisierung anzusprechen sowie Erwartungen an eine zukünftige ÖV-Priorisierung auszutauschen. Zudem wurde zur Multiplikation ein animiertes Video erzeugt, das im Internet zur Verfügung gestellt wird. Über das Fahrgastfernsehen in Hannover wurden Informationen an Kundinnen und Kunden weitergegeben, die die neue innovative Technik erläutern und darstellen. Hierfür wurde ebenfalls das animierte Video eingesetzt.

AP100: Anforderungen und Anwendungsfälle (Leitung: UKS)

Gemeinschaftlich im Konsortium durchgeführter Austausch zur technischen Ausgangssituation in Hannover, den Anforderungen an das neue C-ITS sowie die Erstellung verschiedener Architekturvarianten und Definition der Testgebiete. Es wurden Anwendungsfälle für die modernisierte ÖV-Bevorrechtigung analysiert und verschriftlicht. Weiterhin wurden Workflow-Konzepte entworfen. Die Arbeiten mündeten im Meilensteinbericht 1.

Bevor konkrete Anforderungen an die Erstellung von Systemvarianten formuliert werden konnten, musste eine fundierte Bestandsaufnahme erfolgen. Dies geschah zum einen durch die Sichtung von Dokumenten und zum anderen durch die Recherche des konkreten Datenbestands. Die technologische Ausgangssituation ist in Hannover sehr heterogen und bot somit die Möglichkeit, die technische Ertüchtigung an Geräten verschiedener Hersteller und Generationen zu erproben. Ausgehend von den ermittelten Grundlagen zur Straßenverkehrstechnik in Hannover, zu den verschiedenen ÖV-Fahrzeugen der ÜSTRA und regiobus, hinsichtlich der etablierten und neuen kommunikationstechnischen Möglichkeiten und hinsichtlich der Randbedingungen zum Einsatz der simulationsbasierten Testumgebung wurden die Anforderungen der Akteure an die zukünftige projektbezogene C-ITS-Verkehrstechnik der LHH einschließlich der benötigten Planungs- und Entwurfsinstrumente zusammengetragen und formuliert.

Aus den Möglichkeiten, die ein C-ITS bietet, sind durch fachlichen Austausch im Konsortium unterschiedliche Anforderungen an das zu schaffende System entstanden. Die Anforderungen umfassten sowohl fahrzeug- als auch infrastrukturseitige für C-ITS notwendige Systemkomponenten. Es wurden ebenfalls Aufgabenfelder, welche zur Zurverfügungstellung der Komponenten benötigt werden, definiert.

AP210: Entwicklung einer modularen OBU-Hardware (Leitung: ifak)

Bedingt durch die auf den Weltmärkten festgestellte Verknappung in der Chipindustrie konnten essenzielle Bauelemente zur Bestückung der OBU-Hardware über einen großen Projektzeitraum nicht beschafft werden. Erschwerend war hierbei, dass der Hersteller u-blox seine Produktlinie für den zur Kommunikation erforderlichen V2X-Baustein nicht weiterführte. Durch intensive Marktrecherchen in Verbindung mit der Anwendung von unkonventionellen Einkaufsbedingungen (Shipment after Payment) konnten noch vorhandene Restbestände bei fernöstlichen Händlern für das Projekt LOGIN verfügbar gemacht und beschafft werden. Damit war die Bestückung der im Projekt bereitgestellten OBU-Hardware sichergestellt. Für weitere nicht verfügbare Bauelemente wurden Ersatzelemente gefunden und beschafft. Dass trotz der während der Projektlaufzeit aufgetretenen Widrigkeiten, eine funktionierende Hardwarebasis geschaffen werden konnte, ist dem initiativreichen, flexiblen und engagierten Einsatz der Projektmitarbeiter zu verdanken.

Für den Einsatz der OBU-Hardware in Fahrzeugen des ÖPNV ist ihre umfassende Zertifizierung bezüglich des Brandschutzes und der elektromagnetischen Verträglichkeit erforderlich. Die zur Zertifizierung erforderliche Erfüllung der Anforderungen sind in folgenden Normen, getrennt nach Schienenfahrzeugen und Kraftfahrzeugen beschrieben. Für die Schienenfahrzeuge bestanden die Anforderungen an die OBU-Hardware in der Erfüllung der Normen EN 45545 für das Brandverhalten und EN 50121-3-2 für die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) welche mittels zertifizierten Tests durch benannte Stellen nachzuweisen waren. Für alle diese Normen wurden die Inspektionen

und die Prüfzertifikate durchgeführt und erlangt. Für die Kraftfahrzeuge bestanden die Anforderungen an die OBU-Hardware in der Erfüllung der Normen ECE R10 für die elektromagnetische Verträglichkeit, welche ebenfalls mittels zertifizierten Tests durch eine benannte Stelle nachgewiesen wurde. Als Nachweis für die Erfüllung der Normen zum Brandverhalten konnte die brandschutztechnische Begutachtung der strengeren Norm für Schienenfahrzeuge gemäß DIN EN 45545-2:2020 durch den zugehörigen Inspektionsbericht ebenfalls nachgewiesen werden.

Schnittstellenspezifikation:

Ausgehend von der Systemspezifikation wurden für die OBU folgenden Schnittstellen als erforderlich erkannt und für ihre Verwendung in der OBU spezifiziert:

- Schnittstelle zum Bordrechner der IVU (via Ethernet),
- WLAN-Schnittstelle für Anbindung des Smartphones (Projektpartner UNI Kassel)
- Stromversorgung (24 Volt Bordnetz)
- Mobilfunkschnittstelle für Remotezugriff, und PKI-Zertifikatsupdates, Wartung und Service sowie OverTheAir-Update der OBU-Firmware und der LOGIN-Applikationen

Gehäusespezifikation und mechanische Spezifikation:

Neben den unmittelbar erforderlichen Funktionen des Gehäuses wie der Kapselung der empfindlichen elektronischen Komponenten zum Schutz vor Berührung und zum Schutz vor Staub oder anderen Fremdkörpern, übernimmt das Gehäuse der LOGIN-OBU auch noch zusätzliche, wichtige Aufgaben wie die Kühlung und Schirmung der Elektronik. Nicht zuletzt ermöglicht das Gehäuse die einfache und sichere mechanische Installation in Bus und Bahn.

Wichtige Anforderungen für die mechanische Spezifikation des Gehäuses waren:

- Kompakte Bauform (geringstmögliche Abmessungen),
- Robuste Bauweise (Stoß- und Schockresistent, unempfindlich gegenüber Vibrationen im Fahrbetrieb des Busses),
- passive und effektive Kühlung aller elektronischen Komponenten und somit der Verzicht auf Lüfterkomponenten.
- Erfüllung der Brandschutznorm EN 45545, Verzicht auf brennbare und/oder leicht entflammbare Materialien
- Orientierung an Standardformfaktoren für eine möglichst einfache, schnelle und kostengünstige Fertigung, sowohl in der Test- und Prototypenphase als auch in der späteren Serienfertigung
- Möglichst einfache, aber auch flexible Installation in die verschiedenen Buse und Bahnen-der im Projekt beteiligten Verkehrsunternehmen

Elektronische Spezifikation und Umsetzung der funktionalen Anforderungen:

Die Berücksichtigung geltender Normen für den Einbau elektronischer Komponenten in Fahrzeuge und speziell in Fahrzeugen des öffentlichen Personennahverkehrs standen bei der elektronischen Spezifikation im Vordergrund. In diesem Zusammenhang werden besonders die Norm ECE R10 erwähnt, die sowohl die Aspekte der elektromagnetischen Verträglichkeit als auch Aspekte der Störfestigkeit, z.B. nach ISO7637 umfasst. Hieraus ergeben sich spezielle Anforderungen, die beim Design der Elektronik im Hinblick auf elektronische Filterung aller Schnittstellen, sowie Maßnahmen für die Beschaltung zum Schutz der OBU-Elektronik. Genau wie bei der mechanischen Spezifikation, musste auch bei der Spezifikation der Elektronik auf die Erfüllung der Brandschutznorm EN 45545 geachtet werden. Dies hatte auch einen wesentlichen Einfluss bei der Auswahl der verwendeten elektronischen und elektromechanischen Komponenten zur Folge. Hierbei wurde spezifiziert, dass alle Komponenten für den Automotive-Einsatz geeignet sein und die Vorschrift UL94 erfüllen müssen. Für einige der Schnittstellen wurden gleich zu Beginn die Stecksysteme spezifiziert, wie sie im Fahrzeugeinsatz und speziell im ÖPNV-Fahrzeugen zum Einsatz kommen. Dies betrifft im Einzelnen alle HF-Anschlüsse und die Ethernet-Schnittstelle zum Bordrechner des Busses. Für die HF-Steckverbinder wurde festgelegt, dass die im Automobilbereich verwendete FAKRA-Stecksystem zum Einsatz kommen soll. Dies ermöglicht eine sichere Kontaktierung für die wichtigen Anschlüsse der verwendeten Antenne. Dieses Stecksystem verhindert durch eine spezielle mechanische Verriegelung, dass sich die Verbindung im Fahrbetrieb durch Vibrationen lösen oder lockern kann. Für die Verbindung des Ethernet-Anschlüssen an den IVU-Bordrechner wurde das M12-Stecksystem festgelegt, das auch in der Industrie breite Anwendung findet. Das für die OBU ausgewählte M12-Stecksystem bietet durch eine feste Verschraubung von Stecker und Buchse eine sichere Verbindung, besonders im Fahrbetrieb des Busses.

Ein entscheidender Punkt bei der Spezifikation der OBU-Elektronik war die Festlegung der zu erwartenden Umgebungseinflüsse und speziell des Temperaturbereiches, die sich daraus ergebenden Auswahlkriterien für alle elektronischen Komponenten und somit auch an das finale Design der OBU. Alle Komponenten wurden für den erweiterten Temperaturbereich (-40 °C bis 85 °C) ausgelegt. Diese Festlegung hat auch entscheidenden Einfluss auf das mechanische Design, bzw. auf das Design des Gehäuses der OBU im Hinblick auf die zu realisierende passive Kühlung aller Komponenten, die eine erhöhte Betriebstemperatur erzeugen.

Bei der elektronischen Spezifikation der OBU musste in besonderem Maße auf die speziellen Anforderungen, wie sie im Projekt LOGIN zu erwarten waren, eingegangen werden. Nachfolgend sollen die wichtigsten funktionalen Anforderungen aufgeführt werden, die maßgeblich zur Spezifikation beigetragen haben und die sowohl die projektspezifischen als auch ÖPNV-spezifischen und die für den ÖPNV bauartspezifischen Aspekte berücksichtigen.

- Geeignete MC-Architektur (Arm Mikrokontroller Architektur der Firma NXP, Auswahl basierend auf Performance- und Kompatibilitätserwägungen),
- Auswahl der V2X-Radio Hardware (Auswahl aus Kompatibilitätserwägungen, neuester V2X-Chipsatz der Firma NXP),
- Galvanische Entkopplung aller Schnittstellen,
- ESD-Schutz aller Schnittstellen (Electro-Static-Discharge),
- Schutz vor Überspannungen, Transienten und Bursts in Fahrzeugbordnetzen (siehe auch ISO7637)
- Auswahl eines geeigneten GNSS-Positionierungsempfängers mit Realisierung von Dead-Reckoning Funktionen zur Verbesserung der Positionierungsgenauigkeit bei schwierigen Empfangsbedingungen,
- Auswahl eines geeigneten Moduls für die Mobilfunkkommunikation
- Auswahl entsprechender SIM und Elektronik-SIM für die LTE-Kommunikation
- Auswahl eines geeigneten WLAN/BLE Moduls (für die Kommunikation mit dem Smartphone).

AP220: Entwicklung einer modularen OBU-Firmware (Leitung: ifak)

Den Austausch von V2I-Nachrichteninhalten mittels standardisierter Funktelegramme (CAM, MAPEM, DENM, SREM, SSEM usw.) übernimmt eine Gerätesoftware (OBU-Firmware), welche darüber hinaus auch Unterstützungs- und Teilfunktionen der jeweiligen Applikation ausübt. Dies betrifft etwa die LSA-Anmeldung, die verlustzeitminimierte Abmeldung und die Übermittlung von ÖPNV-Ankunftszeiten gemäß gewählter Fahr- und Haltstrategie. Hierzu wurden Schnittstellen zu den informationsgebenden Komponenten wie dem Smartphone-Endgerät und dem Bordrechner geschaffen und die gelieferten Daten so aufbereitet, dass eine Weiterverarbeitung auf der Gegenseite effizient möglich ist. Anstelle einer üblicherweise monolithischen Firmware wurden nach dem Baukastenprinzip Einzelmodule entwickelt, die unter Nutzung einer geeigneten Technologie für die Interprozesskommunikation durch Hinzufügen oder Abwählen auf unterschiedliche Anwendungsfälle zugeschnitten werden können. Für die Interprozesskommunikation wurde das Netzwerkprotokoll MQTT gewählt, das sowohl die Kommunikation der OBU-internen Prozesse als auch den Datenaustausch von Prozessen auf der OBU mit externen Komponenten und Anwendungen ermöglichte. Nach der Implementierung der Gerätesoftware wurde in verschiedenen Labor- und Feldtests die ordnungsgemäße Funktion getestet und aufgetretene Fehler behoben.

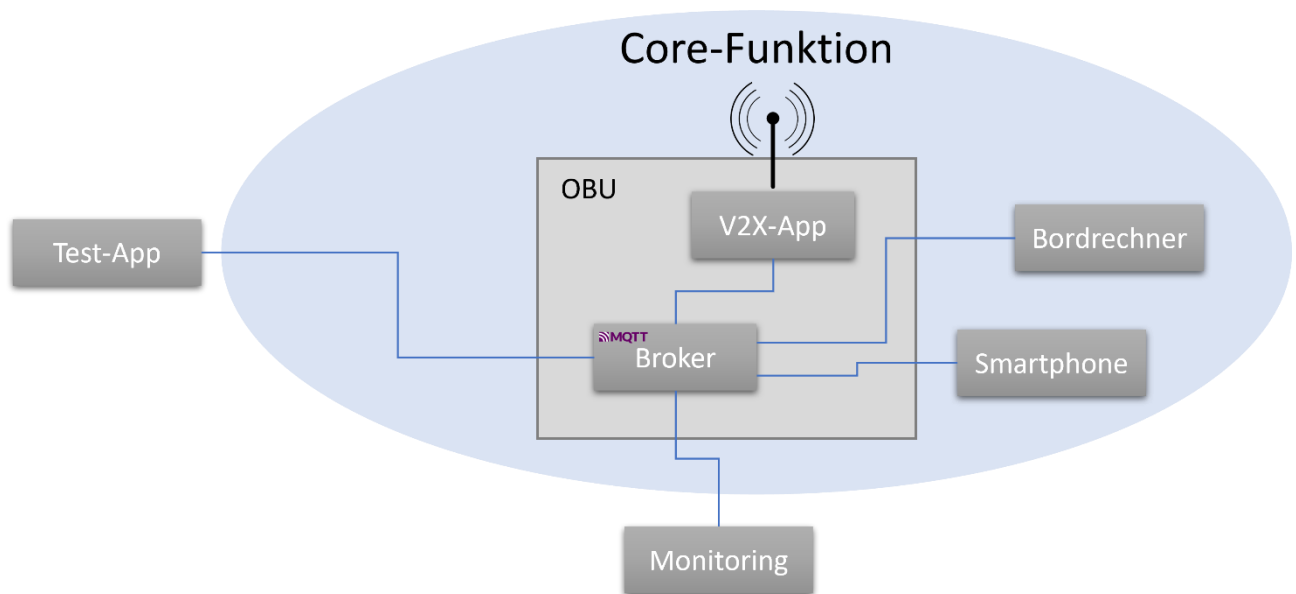


Abbildung 3: Interprozesskommunikation zwischen den einzelnen Komponenten mittels MQTT.

Der zentrale MQTT-Broker, über den der hauptsächliche Datenverkehr abgewickelt wird, befindet sich in diesem Fall auf der OBU, kann jedoch bei Bedarf auch außerhalb der OBU auf jedem beliebigen Netzwerkteilnehmer installiert werden. Das Netzwerkprotokoll MQTT arbeitet nach dem publish/subscribe-Verfahren. Dabei können neue Teilnehmer und Komponenten, die nicht unmittelbar zur Kern-Funktionalität des Systems gehören (Core-Funktion, s. Abbildung 3), dem Teilnehmernetzwerk auf einfache Weise hinzugefügt oder auch wieder entfernt werden, ohne dass die Funktion des Systems dadurch beeinträchtigt wird oder in das System eingegriffen werden muss. So wurden beispielsweise im Rahmen von Tests SREMs, die normalerweise vom Bordrechner oder Smartphone kommen, von einer Test-App generiert und über den MQTT-Broker an die OBU übertragen, welche diese dann als V2X-Nachrichten versendete. Im Gegenzug werden alle von der OBU über die Luftschnittstelle empfangenen V2X-Daten an den MQTT-Broker übertragen und können von internen oder externen Komponenten abonniert und verarbeitet werden. Beispielfhaft ist in Abbildung 3 eine Monitor-Komponente eingezeichnet, welche beispielsweise empfangene SSEMs in einer entsprechenden Applikation oder die Fahrzeugposition auf einer Karte darstellen könnte.

Die zentrale Komponente in Bezug auf die Funktionalität der OBU als Sender und Empfänger von V2X-Nachrichten ist die V2X-Applikation (s. Abbildung 3). Sie ist in der Programmiersprache C geschrieben und enthält den V2X-Stack für die Kodierung und Dekodierung sämtlicher V2X-Nachrichten, wie CAM, SREM, SSEM, MAPEM, SPATEM oder DENM. Um eine bestmögliche Flexibilität bei der Verarbeitung empfangener und dem Senden von V2X-Nachrichten zu erhalten, steht eine MQTT-basierte Schnittstelle zur Verfügung. Die Daten einer V2X-Nachricht, welche in einem definierten XML-Format an den MQTT-Broker gesendet werden, empfängt die V2X-Applikation. Diese wiederum abonniert oder subskribiert als MQTT-Client die entsprechenden

Topics am MQTT-Broker und kodiert sie in ein Binärformat um, und versendet diese über die Luftschnittstelle. Auf der anderen Seite werden, die im Binärformat empfangenen V2X-Daten dekodiert, in ein XML-Format gewandelt und mit dem entsprechenden Topic an den MQTT-Broker gesendet (publisht). Komponenten und Anwendungen, wie beispielsweise das Smartphone können die entsprechenden Topics abonnieren (subskribieren) und erhalten somit automatisch die jeweiligen V2X-Nachrichten über den MQTT-Broker als XML-Daten. Abbildung 4 zeigt das Verhalten anhand des Sendens von SREM- und des Empfangs von SSEM-Nachrichten.

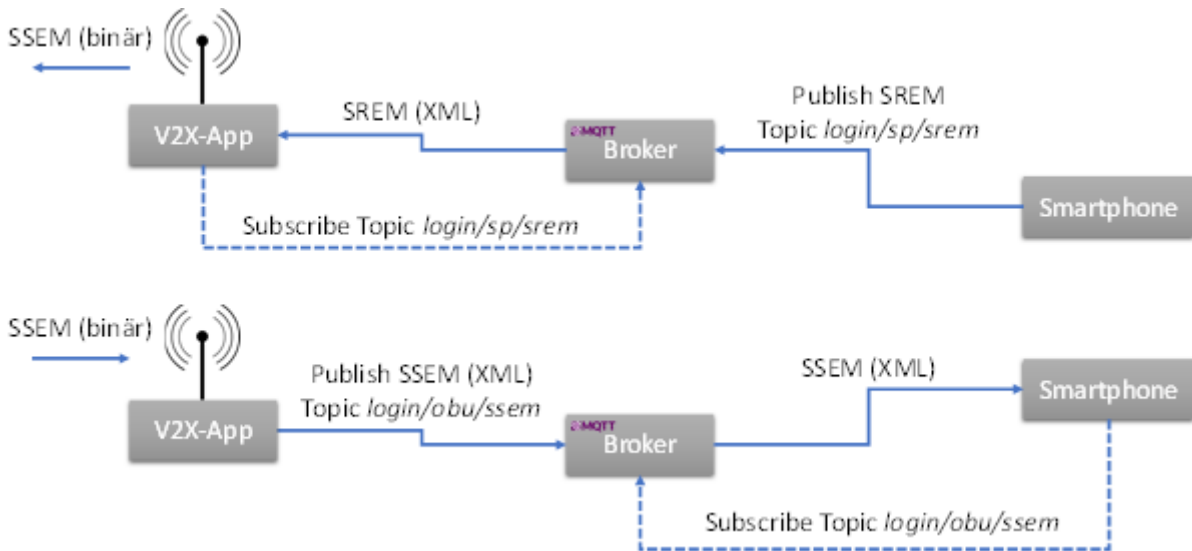


Abbildung 4: Senden und Empfang von V2X-Nachrichten über die MQTT-Schnittstelle.

Bei den zu übertragenden Daten handelt es sich um sensible, sicherheitsrelevante Informationen, die vor Manipulation geschützt werden müssen. Um einen sicheren Datentransfer zu ermöglichen, erfolgt der Datenaustausch zwischen OBU und dem ifak-Server verschlüsselt über ein VPN. Eine auf der OBU installierte Firewall mit entsprechenden Regeln blockiert zum einen alle Verbindungen, die nicht für die Systemfunktionen notwendig sind und sorgt zum anderen dafür, dass Daten vom Smartphone über die OBU an den Datenserver der Uni Kassel weitergeleitet werden. Abbildung 5 zeigt alle Kommunikationspartner mit den zugehörigen Verbindungen.

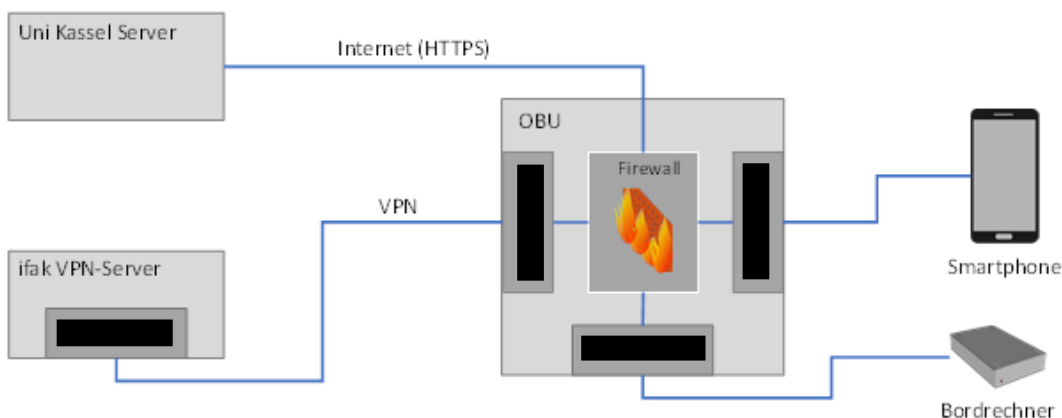


Abbildung 5: Kommunikationsteilnehmer und Verbindungen

AP230: Entwicklung einer App-Plattform für Endgerät (Leitung: UKS)

Die Entwicklung der App erfolgte fortlaufend unter regem inhaltlichem Austausch zwischen allen Beteiligten der ÖPNV-Bevorrechtigung. Es wurden Anforderungen an die App festgelegt (bspw. MAP-Matching anhand GPS-Daten, SPaT & MAP auslesen, SRM erstellen, SSM auswerten, etc.). Weiterhin wurde das Erscheinungsbild sowie die Bedienbarkeit der App (HMI) abgestimmt. Zur Überprüfung neu entwickelter Funktionen wurden, sobald es möglich war, Testfahrten in den ÖV-Fahrzeugen durchgeführt. Durch diese Testfahrten konnten schrittweise bestehende Probleme bestimmt und ausgebessert werden, bevor die jeweils neue Version der Applikation auf die Smartphones in den LOGIN Fahrzeugen aufgespielt wurde. Die Verarbeitungsroutinen der C-ITS Nachrichten auf Basis der vorherigen Spezifikation der C-ITS Nachrichten wurden vollumfänglich entwickelt. Das Map-Matching-Verfahren zur Lokalisation des Fahrzeugs im Testgebiet ist voll funktionsfähig. Der Datensammelservers wurde konzipiert, aufgebaut, softwaretechnisch versorgt und in Betrieb genommen. Kommunikations-Schnittstellen zum Datensammelservers sowie zur OBU und dem Bordrechner wurden vollumfänglich entwickelt und sind funktionsfähig. Das HMI wurde für die durchführbaren Pilotphasen (1 und 2) bereitgestellt. Darstellungen der HMI in der Pilotphase 3 (Ergänzung des C-ITS um die Informationsbereitstellung der SPaT Informationen in Form eines Grünbandes) wurde aufgrund der Verzögerungen des Starts des Pilotbetriebs Phase 1 sowie der instabilen Funktionalität der Phase 2 (häufig SSM Rejected) nicht implementiert. Grund hierfür ist das Ziel, die Funktionalitäten der App schrittweise zu implementieren und die Multikausalität von ggf. auftretenden Fehlfunktionen auszuschließen. Hierdurch sollen möglichst lange Phasen eines stabilen Bevorrechtigungsablaufs mit C-ITS ermöglicht werden, sodass die gewonnenen Daten für die Evaluation einem Mindestmaß an Qualität entsprechen. Die Phase 3 und somit die Implementation des Grünbandes ist aufgrund der kurzen Restlaufzeit des Projektes und der weiterhin unzureichenden Menge an qualitativ hochwertigen Daten nicht mehr realisierbar. Es wird sich auf die Evaluation der Phase 1 und 2 konzentriert.

AP240: Anwendungsintegration in Bordrechnersoftware (Leitung: IVU)

Zur umfassenden Umsetzung einer betriebstauglichen Lösung der ÖPNV-Bevorrechtigung mittels C-ITS-Nachrichten war eine Integration der Funktionalitäten der Anforderungslogik sowie der Fahrer-Fahrzeug-Kommunikation innerhalb der Software der bei der ÜSTRA und regiobus Hannover bereits vorhandenen Bordrechner (sowohl in Bussen als auch Stadtbahnen) der IVU vorgesehen. Mittels der nach Versand der Anfrage erhaltenen Daten kann die Fahrempfehlung zur Anzeige auf dem Bordrechner für das Fahrpersonal erstellt werden. Die Fahrempfehlung wird beim Erhalt einer Prognose einmalig bestimmt und anschließend angezeigt, bis der Bereich der Bevorrechtigung wieder verlassen wird bzw. die Haltlinie der Ampel passiert wurde. Bei größeren Abweichungen der Prognose aus der SPAT wird die Fahrempfehlung neu bestimmt und die Anzeige aktualisiert. Einige Elemente des Berechnungsalgorithmus, wie z.B. die Pufferzeit bis zum Erreichen der Haltlinie vor

einem Wechsel von Freigabe- zu Sperrzeit, sind dabei parametrisiert, also konfigurierbar, um auf spezifische Gegebenheiten reagieren zu können. Die Benutzeroberfläche der Bordrechnersoftware wurde erweitert, um die neuen Funktionen der Anforderungslogik und die Fahrempfehlungen darzustellen. Ein Statusicon für die moderne LSA-Bevorrechtigung in Form eines kleinen Signalgebers wurde ergänzt. Abbildung 6 stellt die drei Varianten dieses Statusicons dar.



Abbildung 6: Icons für die Statusanzeige der LSA-Bevorrechtigung

Sobald das Statusicon auf „Grün erwartet“ wechselt, wird außerdem die Fahrempfehlung für das Fahrpersonal in Form eines aufgeblendeten Rechtecks im rechten oberen Bereich der Bordrechner-GUI angezeigt. Je nachdem, ob Sperr- oder Freigabezeit erwartet wird, und in Abhängigkeit der empfohlenen Geschwindigkeit, ist die Anzeige grün, gelb oder orange eingefärbt. Für „Halt zu erwarten“ wurde die Farbe Orange anstelle von Rot verwendet, da innerhalb der Bordrechneranzeige Rot besonders wichtigen Fällen, wie Alarm oder Notfallruf, vorbehalten bleiben muss. Für alle Varianten zeigt Abbildung 7 je einen Screenshot der Bordrechnersoftware als Beispiel.

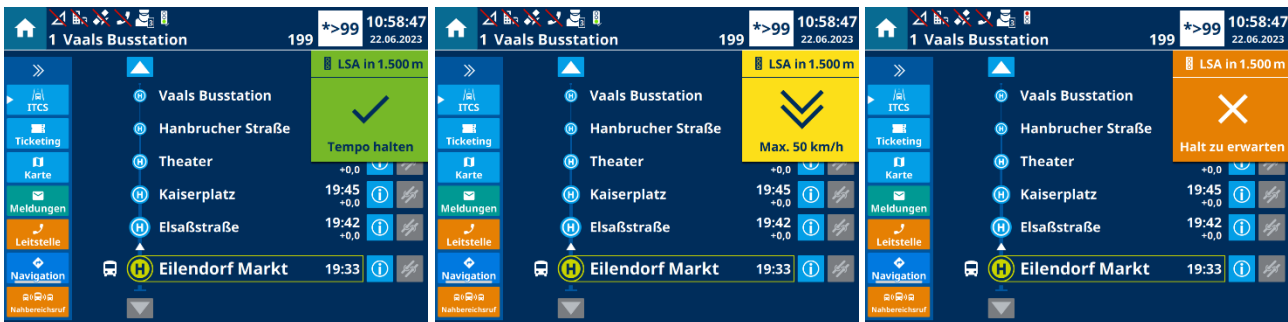


Abbildung 7: Bordrechner-GUI IVU.Cockpit drei Beispielen für Fahrempfehlungen

Mit dem Konzept und dem Softwareentwurf für die Anwendungsintegration wurde nach dem ursprünglichen Zeitplan begonnen. Auch die Implementierung der Anforderungslogik zur Verarbeitung der erhaltenen Nachrichten und Erstellung der Bevorrechtigungsanfrage sowie der Fahrer-Fahrzeug-Kommunikation zur Anzeige des Bevorrechtigungsstatus und der Fahrempfehlungen erfolgten zunächst losgelöst von der Projektverzögerung. Veränderte Rahmenbedingungen, wie z.B. Problematik bei der SRM-Verarbeitung durch die RSU, ergaben sich zu relevanten Teilen erst parallel dazu. Die Notwendigkeit der frühzeitigen Einplanung von Entwicklungskapazitäten in einem Wirtschaftsunternehmen in Kombination mit der Gesamtverzögerung im Projekt führte dazu, dass nach Bekanntwerden von Problemen während der Tests

der entwickelten Funktionalitäten im Test-PKW nicht mehr genug Kapazitäten zur Verfügung standen, um die notwendigen Anpassungen rechtzeitig vor Projektende umzusetzen und testen zu können. Ein weiteres Problem hierbei stellt die verzögerte Linuxmigration der vorhandenen Bordrechner dar. Diese erfolgt unabhängig vom Projekt LOGIN als kommerzielles Projekt von ÜSTRA und IVU und war ursprünglich zeitlich so geplant, dass die für den Feldtest notwendigen Bordrechner bereits dahingehend modernisiert, hätten sein sollen. Leider verzögerte sich, u.a. durch den Cyberangriff auf die ÜSTRA, auch dieser Vorgang, so dass das für die neu implementierten Funktionalitäten notwendige Betriebssystem noch nicht auf den Bordrechnern verfügbar ist.

Es ist vorgesehen, auch nach Ende des Projekts die Anpassungen und Tests vorzunehmen, um eine vollständige Funktionalität der Anwendung auf den Bordrechnern zu erreichen.

AP311: LSA-Erweiterung um RSU (Leitung: ifak)

Das Ziel des Arbeitspakets bestand darin, die einzelnen LSA der Testgebiete mit RSU auszurüsten, um den V2I-Datenaustausch zwischen ÖV-Fahrzeugen und den LSA sowie mit zentralen Einrichtungen zu gewährleisten. Basierend auf den erörterten Anforderungen und der abgeleiteten Anwendungsfälle wurden die Systemarchitekturvarianten und die Untersuchungsgebiete festgelegt. Die Voraussetzungen für die Installation der benötigten RSU im straßenverkehrstechnischen Umfeld variierten je nach endgültiger Auswahl der in das System einbezogenen Knotenpunkte. Dies betrifft bspw. die Nutzbarkeit vorhandener Kabeltrassen, Kabelschächte, Schaltschränke und Masten. Für eine stabil funktionierende und zugleich möglichst aufwandsarme RSU-Installation wurden entsprechende Planungsarbeiten durchgeführt.

Zunächst wurden die erforderlichen Leistungsmerkmale der RSU sowie die notwendigen Voraussetzungen für den Anschluss der RSU an die Steuergeräte verschiedener Signalbauhersteller ermittelt. Diese Leistungsmerkmale wurden detailliert beschrieben, um den Ansprüchen der verschiedenen Projektpartner gerecht zu werden. Als Ergebnis der spezifizierten Leistungsmerkmale war aufgrund von Sicherheitsbedenken das Verbauen bzw. Installieren herstellerunabhängiger RSU nicht möglich. Daraus resultierte das Verbauen jeweils herstellereigener RSU an den jeweiligen LSA. Die Beschaffung und Installation der RSU wurden gemeinsam mit der notwendigen Erneuerung der Steuergeräte bei den zuständigen Signalbaufirmen beauftragt. Die RSU wurden schrittweise an den Knotenpunkten installiert und in Betrieb genommen. Neben der Hardware-Erweiterung war auch eine Erweiterung der Software notwendig, sodass die Nachrichten von RSU an die Steuerungssoftware in das Steuergerät übergeben werden können. Voraussetzung zur Nutzung dieser Daten durch die im Arbeitspaket AP313 entwickelten LISA-CITS-Funktionen war die Entwicklung einer ersten Version des Vehicle-Buffers. Der Begriff Vehicle-Buffer beschreibt eine hierarchische Datenstruktur, welche die vorverarbeiteten Daten der vernetzten ÖV-Fahrzeuge der LSA-Steuerung zur Verfügung stellt. Dabei werden nicht einzelne Nachrichten, sondern einzelne ÖV-Fahrzeuge betrachtet (identifiziert durch die StationID), deren Eigenschaften je VT-Takt aktualisiert werden. Die Inhalte der

empfangenen CAM- und SREM-Nachrichten werden gefiltert, vorverarbeitet und der LSA-Steuerung bereitgestellt. Da die CAM/SREM-Nachrichten asynchron zum VT-Takt des Steuergerätes empfangen werden, müssen die Meldungen unabhängig vom VT-Takt empfangen und vorgehalten werden. Der Vehicle-Buffer ist eine Momentaufnahme der empfangenen CAM/SREM-Nachrichten und wird zu Beginn jedes VT-Takts aktualisiert. Während des Ablaufs eines VT-Takts darf sich der Vehicle-Buffer nicht ändern, da es sonst zu Inkonsistenzen im Ablauf der Steuerlogik kommen kann. In der Zwischenzeit werden jedoch weiterhin CAM/SREM-Nachrichten empfangen, gefiltert und aufbereitet. Jedes Fahrzeug, von dem eine SREM-Nachricht mit einer Anforderung für den entsprechenden Knotenpunkt empfangen wurde, wird im Vehicle-Buffer eingetragen und verbleibt dort bis zum Timeout. Hierbei ist zu beachten, dass ein Fahrzeug mehrere Anforderungen (Requests) für einen Knotenpunkt senden kann. Aus diesem Grund müssen unterschiedliche Anforderungen für ein Fahrzeug vorgehalten werden können. Mit jeder neu empfangenen SREM werden die Attribute des Fahrzeugs bzw. der Anforderung aktualisiert. Bezüglich der SREM ist bei der Vehicle-Buffer Implementierung zu beachten, dass das Sequenzhandling zwischen RSU und Steuergerät erfolgen muss. Von der LSA-Steuerung werden die Inhalte Station ID, Request ID und Priorisierungsstatus gesetzt. Diese Inhalte beziehen sich auf die SREM, die zuletzt im Vehicle-Buffer bereitgestellt wurde. Es muss gewährleistet werden, dass das System sich die Sequenznummer der SREM merkt, da während der Verarbeitung durch die LSA-Steuerung bereits weitere neuere SREM-Nachrichten mit anderen Sequenznummern vom Fahrzeug geschickt werden konnten.

Im ersten Schritt wurde seitens der Firma SWARCO der Knotenpunkt K122 im Testgebiet Ricklinger Stadtweg mit einer RSU vom Typ Cohda Wireless MK5 und der SWARCO CCAM-Software 1.5 im März 2023 ausgestattet. Der späte Installationstermin ist durch Personalengpässe im Bereich der Softwareentwicklung und des lokalen technischen Personals begründet. Im Steuergerät wurde die bestehende LISA 7-basierte verkehrstechnische Logik mit einer prototypischen Bibliothek erweitert, um eine Kommunikation über den Vehicle-Buffer zu ermöglichen. Ziel dieser Testinstallation war die Erprobung der Lösung im Hinblick auf Stabilität und Einsatztauglichkeit. Insbesondere Themen wie der Umgang mit Teilknoten und Fahrzeuglänge sowie Darstellung der Fahrbeziehung durch den Knoten wurden an der K122 praxisnah erarbeitet. Beispielsweise wurde gelernt, dass es bei parallel verlaufenden Spurführungen für Straßenbahn und Bus die CAM nicht nur für die Fahrzeuglänge bei Bahnen, sondern auch für die Unterscheidung der Fahrzeugtypen zu nutzen ist. Diese Inhalte wurden sukzessive ergänzt und die resultierenden Fehlerbehebungen wurden im November 2023 abgeschlossen. Anfang Januar 2024 war die Ausrüstung an den restlichen Knotenpunkten der Testgebiete abgeschlossen.

Im Regelfall sendet die über den Vehicle-Buffer verbundene RSU den bestehenden LSA-Signalisierungszustand über die SPaTEM-Nachricht aus. Projektziel war aber auch die Verwendung der Schaltzeitprognose in den Fahrzeugen. Dazu wurde in der Region Hannover eine Schaltzeitprognose als Bestandteil der verkehrstechnischen Logik im Steuergerät installiert. Über

den Vehicle Buffer werden diese Informationen an die RSU geliefert (lokale Prognose). Die Landeshauptstadt Hannover lässt bereits eine zentrale Prognose durch die Firma GEVAS erstellen. Der Prognoserechner bezieht seine Informationen vom Verkehrsrechner und verbreitet die Ergebnisse über Mobilfunk. Im Rahmen des Projektes wurde die OCIT-C-Schnittstelle zwischen den beiden Systemen um die SPAT-Nachricht erweitert. Über OCIT-O v3 wurde diese Nachricht dann vom Verkehrsrechner an die einzelnen LSA-Steuergeräte weitergeleitet. Von dort gelangen sie über eine Erweiterung des Vehicle Buffers an die RSU, die diese dann als SPaTEM ausstrahlt. Laut Zeitplan war dieses Arbeitspaket für Juli 2021 bis Juli 2022 vorgesehen. Die Installation der RSU der Firma Yunex wurde innerhalb dieses Zeitraums abgeschlossen.

AP312: RSU-Zentrale (Leitung: ifak)

In der Diskussion mit den Signalbaufirmen hat sich herausgestellt, dass die Verwaltung der RSU jeweils nur über proprietäre Lösungen der Firmen möglich ist. Dies hat verschiedene Gründe, wie oder auch die Notwendigkeit der Beachtung der Vorgaben im Rahmen der Kritis-Verordnung und des entsprechenden B3S. Zudem wurden die notwendigen bzw. sinnvollen Funktionalitäten der RSU-Zentralen definiert. Die einzelnen RSU an den jeweiligen Knotenpunkten sollen Daten von einer RSU-Zentrale beziehen können. Dies betrifft bspw. die jeweils aktuelle MAP. Hierfür müssen zudem geeignete Kommunikationswege identifiziert und geschaffen werden. Die detaillierten Anforderungen an die Kommunikation zwischen RSU und Zentrale wurden ermittelt. Auf dieser Basis wurden anschließend die Funktionen der RSU und der Zentrale einschließlich der Schnittstelle zwischen beiden Komponenten spezifiziert. Resultierend aus den spezifizierten Leistungsbeschreibungen wurden Vergabeverfahren durchgeführt.

Die Yunex-Zentrale für Yunex RSU wurde durch die LHH am 19.09.2022 beauftragt. Die Anlagen der Region Hannover wurden über die RSU-Zentrale der LHH angebunden. Diese Zentrale wurde im März 2023 installiert und für ein Jahr in Betrieb genommen. Die Verbindung von einer RSU zu der Zentrale erfolgt mittels LTE (VPN). Die Einbindung von max. 10 RSU und drei Zugängen zum Customer Web Portal ist möglich. Das Umschalten auf die Yunex-RSU, das Beziehen von Mitschnitten sowie die MAP-Versorgung sind zudem aus der Ferne möglich.

Das Ziel einer zentralenseitigen Anbindung der RSUs im Projekt war das Sicherstellen einer Fernversorgung der LSA-spezifischen MAPs und die Übertragung der Schaltzeitprognosen. An die SWARCO-RSUs, wie unter AP311 bereits dargestellt, wird die Prognose im Bereich der LHH von der Verkehrsrechnerzentrale über OCIT-O v3 übertragen. Dieses Protokoll sieht auch eine Versorgung von MAPs an die RSU und eine Übermittlung von aggregierten CAM-Daten an den Verkehrsrechner vor. Allerdings wurden diese Optionen im Projekt nicht genutzt, denn hierfür wären umfangreiche Erweiterungen des Verkehrsrechners nötig gewesen. Da jede SWARCO-RSU eine eigene IP-Adresse im Verkehrsrechnernetz besitzt, lassen sich hierüber die Kreuzungs-spezifischen MAPs über die GUI der RSU fernversorgen. Dies gilt auch für die vier SWARCO-RSUs in der Region

Hannover, weil sie an das Verkehrsrechnernetzes der LHH angebunden sind. Das hier verwendete Produkt zur lokalen Prognose ist auf eine direkte Verbindung zwischen RSU und Steuergerät ausgelegt. Die angedachte Erfassung des Fahrweges der Busse und Bahnen hätte die Aufzeichnung und Archivierung von individuellen CAM bedeutet. Leider ist diese Funktionalität in einem kommerziellen Produkt seitens SWARCO zurzeit nicht vorgesehen, da es, auch seitens vieler Kunden, große Bedenken gibt, dass dies dem Datenschutz widersprechen könnte.

AP313: LSA-Erweiterung zur Verarbeitung von C-ITS Daten (Leitung: ifak)

Wie im AP311 beschrieben, wurden die C-ITS Nachrichten über den Vehicle-Buffer von der RSU in die Steuerlogik der Lichtsignalanlage übermittelt. Die Logik der verkehrsabhängigen Steuerung, welche auf dem Steuergerät der LSA läuft, wird mittels einer speziellen Softwareentwicklungsumgebung (Verkehrsingenieurarbeitsplatz LISA) erstellt. Der Verkehrsingenieurarbeitsplatz bietet vorgefertigte Funktionen zur Erstellung von regelbasierten verkehrsabhängigen Steuerungen an. Aufgrund der neuen Nachrichtenformate bestand die Notwendigkeit neue Funktionen konzipierten und zu implementieren. Insgesamt wurden die folgenden neun SREM/SSEM-Funktionen im Zuge des Projektes entwickelt.

SREM-basierte Funktionen
SremStAttr (int, int, int)
SremStID (int)
SremStCount
SremStName (int)
SremStRouteName (int)
SremStRequCount (int)
SremStRequID (int, int)
SremStRequIndex (int, int)
SSEM-basierte Funktionen
SsemRespStatSet (int, int, int)

Tabelle 2: SREM- und SSEM-basierte Funktionen

Exemplarisch werden in Tabelle 3 und Tabelle 4 die Funktionen SremStAttr und SsemRespStatSet erklärt.

SremStAttr (Station-ID, Request-ID, Konstante)

Die SREM-Nachricht umfasst zwei Container: den SREM-Container und den SREM Request Container. Ein SREM-Container kann mehrere SREM Request Container enthalten. Hintergrund ist, dass ein Fahrzeug mit einer SREM mehrere Priorisierungsanfragen an eine LSA schicken kann, z.B. bei mehreren Teilknoten eine Priorisierungsanfrage für jeden Teilknoten. Im SREM-Container

stehen Informationen zum Fahrzeug, im Request Container stehen Art der Priorisierungsanfrage, Quell- und Zielarm (Inbound und Outbound Approach) und die Restfahrzeit (ETA). Die Funktion kann die Informationen beider Container ausgeben und hat deshalb drei Argumente: StationID, RequestID und der gewünschte auszugebende Inhalt. Sollen Informationen aus dem SREM-Container abgefragt werden, ist die Angabe einer RequestID theoretisch nicht notwendig. Da das Argument aber nicht weggelassen kann, kann man in dem Fall 0 angeben. Das Argument RequestID wird in dem Fall von der Funktion nicht ausgewertet.

Konstante	Wert	RequestID relevant	Beschreibung
SREM_cTimeStp	0		Zeitstempel der letzten SREM als Unixtime
SREM_cEta	1	ja	Restfahrzeit in ms (ETA - Estimated Time to Arrival)
SREM_cPrioRqType	3	ja	Art der Priorisierungsanfrage
SREM_cTranStatus	4		Status beim Halt
SREM_cDelay	5		Fahrplanabweichung Verspätung in s
SREM_cEarly	6		Fahrplanabweichung Verfrühung in s
SREM_cVehRol	7		Funktion des Fahrzeugs
SREM_cVehSubRol	8		Untergeordnete Funktion des Fahrzeugs
SREM_cImpLev	9		Wichtigkeit der Prioritätsanfrage
SREM_cInAppr	12	ja	Nummer des Knotenarms, auf dem das Fahrzeug ankommt
SREM_cOutAppr	13	ja	Nummer des Knotenarms, auf dem das Fahrzeug den Knotenpunkt verlässt

Tabelle 3: SREM-Container

Beispiel: SremStAttr (5501750, 1, SREM_cEta)

Ergebnis: Restfahrzeit für das Fahrzeug mit der StationID 5501750 und der RequestID 1 in ms (ETA - Estimated Time to Arrival).

SsremRespStatSet (Station-ID , Request-ID, Konstante)

Mit der SSEM meldet die verkehrsabhängige Steuerung den Priorisierungsstatus als Antwort auf die SREM zurück.

Konstante	Wert	Beschreibung
SSEM_cUnknown	0	Unbekannt
SSEM_cRequested	1	Priorisierungswunsch wird angefordert
SSEM_cProcessing	2	Priorisierungswunsch wird verarbeitet
SSEM_cWatchOtherTraffic	3	Priorisierungswunsch wird zurückgestellt
SSEM_cGranted	4	Priorisierungswunsch wird gewährleistet
SSEM_cRejected	5	Priorisierungswunsch wird abgelehnt
SSEM_cMaxPresence	6	Priorisierungswunsch wird nach Zeitüberschreitung abgelehnt
SSEM_cReserviceLocked	7	Priorisierungswunsch wird auf unbestimmte Zeit wegen einer Aufnahmesperre von Priorisierungswünschen zurückgestellt

Tabelle 4: SSEM-Container

Beispiel: SsremRespStatSet (5501750, 1, SSEM_cGranted)

Ergebnis: Für das Fahrzeug mit der StationID 5501750 und der RequestID 1 wird der Priorisierungswunsch gewährleistet.

Zum Testen der oben beschriebenen Funktionen und deren Einbettung in die Gesamtlogik wurden spezielle Testwerkzeuge im Verkehrsingenieurarbeitsplatz LISA konzipiert und entwickelt. Die einzelnen SREM-Nachrichten konnten somit zu unterschiedlichen Zeitpunkten und mit unterschiedlichen Inhalten virtuell verschickt werden. Somit war es möglich die Reaktion der Logik auf die Nachricht im Vorfeld der Versorgung am realen Steuergerät zu prüfen. Abbildung 8 zeigt das vordefinierte Nachrichtenset.

	Station ID	Intersection ID	Request ID	Eta [s]	Eta Duration [s]	Priority request type	Transit vehicle status	Delta time (delay positiv/early negative) [s]	Veh role	Veh Sub-role	Importance level	Inbound	Outbound	Name	Route name	Comment	SREM
1	111	0	1	30	-0,001	priorityRequest		0	publicTransport	Unknown	Unknown	Leg 1	Leg 2			K1 (von oben nach unten)	Send Delete
2	111	0	2	55	-0,001	priorityRequest		0	publicTransport	Unknown	Unknown	Leg 3	Leg 4			K11	Send Delete
3	111	0	1	-0,001	-0,001	priorityCancellation		0	publicTransport	Unknown	Unknown	Leg 1	Leg 2			K1 Abm.	Send Delete
4	111	0	2	-0,001	-0,001	priorityCancellation		0	publicTransport	Unknown	Unknown	Leg 3	Leg 4			K11 Abm.	Send Delete
5	222	0	1	30	-0,001	priorityRequest		0	publicTransport	Unknown	Unknown	Leg 4	Leg 3			K21 (von unten nach oben)	Send Delete
6	222	0	2	55	-0,001	priorityRequest		0	publicTransport	Unknown	Unknown	Leg 2	Leg 1			K2	Send Delete
7	222	0	1	-0,001	-0,001	priorityCancellation		0	publicTransport	Unknown	Unknown	Leg 4	Leg 3			K21 Abm.	Send Delete
8	222	0	2	-0,001	-0,001	priorityCancellation		0	publicTransport	Unknown	Unknown	Leg 2	Leg 1			K2 Abm.	Send Delete
9	2000	0	1	30	-0,001	priorityRequest		0	publicTransport	Unknown	Unknown	Leg 1	Leg 2			S2 (von oben nach unten)	Send Delete
10	2000	0	2	55	-0,001	priorityRequest		0	publicTransport	Unknown	Unknown	Leg 3	Leg 4			S21 (von oben nach unten)	Send Delete
11	2000	0	1	-0,001	-0,001	priorityCancellation		0	publicTransport	Unknown	Unknown	Leg 1	Leg 2			S2 Abm.	Send Delete
12	2000	0	2	-0,001	-0,001	priorityCancellation		0	publicTransport	Unknown	Unknown	Leg 3	Leg 4			S21 Abm.	Send Delete
13	1000	0	1	30	-0,001	priorityRequest		0	publicTransport	Unknown	Unknown	Leg 4	Leg 3			S11	Send Delete
14	1000	0	2	55	-0,001	priorityRequest		0	publicTransport	Unknown	Unknown	Leg 2	Leg 1			S1	Send Delete
15	1000	0	1	-0,001	-0,001	priorityCancellation		0	publicTransport	Unknown	Unknown	Leg 4	Leg 3			S11 Abm.	Send Delete
16	1000	0	2	-0,001	-0,001	priorityCancellation		0	publicTransport	Unknown	Unknown	Leg 2	Leg 1			S1 Abm.	Send Delete
17	111	0	1	10	-0,001	priorityRequestUpdate		0	publicTransport	Unknown	Unknown	Leg 1	Leg 2			K1 update	Send Delete
18	1000	0	2	20	-0,001	priorityRequestUpdate		0	publicTransport	Unknown	Unknown	Leg 2	Leg 1			S1 update	Send Delete

Abbildung 8 Vordefinierte SREM-Testnachrichten

AP320: Modernisierung von LSA-Steuergeräten (Leitung: LHH)

Für das Projekt waren 14 LSA-Steuergeräte vom Hersteller SWARCO für die Kommunikation mit je einer RSU und der Verarbeitung von C-ITS-Informationen zu ertüchtigen. Zum Zeitpunkt der Beauftragung bedeutete dies, dass Geräte des Typs ACTROS mit der CPU-Baugruppe LS 4000 oder neuer und dem Betriebssystem (Firmware) G4sh zum Einsatz kommen mussten, um mit der verkehrstechnischen Entwicklungssoftware LISA 7 erstellte Steuerprogramme ausführen zu können. Zusätzlich zur Firmware wurde für die zehn Anlagen im Bereich der LHH die SWARCO-Software Connect-Server 6.5 benötigt, die den Datenaustausch über OCIT, insbesondere der SPaT-Nachricht aus OCIT-O v3.0, zum Verkehrsrechner sicherstellt. Damit eine Kommunikation zwischen Steuergerät und RSU, Steuergerät und Verkehrsrechner sowie RSU und PKI-Server möglich ist, war ein Einbau eines DSL-Routers in das Steuergerätegehäuse erforderlich. Für die Stromversorgung der RSU wurde ein Power-over-Ethernet-Injector montiert. Im Zuge dieser Modernisierung wurden auch die Signalsteuerungsprogramme den aktuellen verkehrlichen Erfordernissen angepasst.

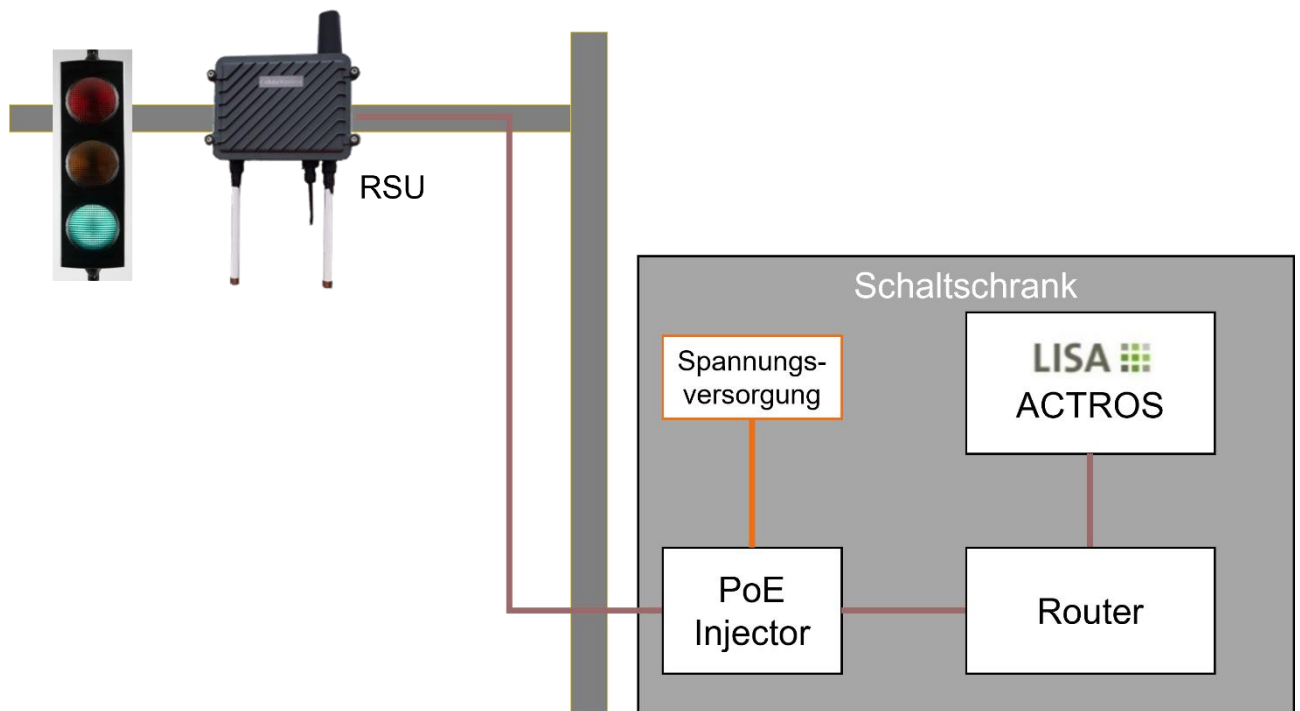


Abbildung 9: Komponentenübersicht eines Steuergerätes mit RSU

Die Erneuerungsmaßnahmen wurden zur Validierung zuerst am Steuergerät des Knotens K122 im Februar 2023 umgesetzt. Aufgrund der COVID19-Pandemie, einer SWARCO internen Umstrukturierung und Personalengpässen konnte die Umsetzung erst mit einem Jahr Verspätung beginnen. Hier kam erstmalig auch die prototypische Erweiterung der Steuerungsprogramme um SREM- und SSEM-Funktionalitäten zum Einsatz. Nachdem die Tests an dieser LSA im November 2023 abgeschlossen waren, wurden die anderen Anlagen im Dezember 2023 und Januar 2024 modernisiert. Die erforderlichen Leistungsmerkmale der RSU und die Voraussetzungen für den Anschluss der RSU an die Steuergeräte der verschiedenen Signalbauerhersteller wurden als erster Schritt des Modernisierungsprozesses der Lichtsignalanlagen ermittelt. Die Vergabeverfahren für die Lieferung von LSA-Steuergeräten basierten auf den vorbereiteten Leistungsbeschreibungen. Die Verfahren zur Vergabe von Angeboten und zur Modernisierung der Steuergeräte werden nacheinander durchgeführt. Die Bestellungen für sämtliche Lichtsignalanlagen, die im Rahmen des Projekts betroffen sind, wurden von Mai 2021 bis September 2022 ausgestellt. Allerdings konnten die Dienstleistungen erst ab dem zweiten Halbjahr 2023 realisiert werden. Die gesamte Umsetzung dauerte bis zum Januar 2024. Bauseitig wurden die Installations- und Aufstellungsarbeiten durchgeführt und verkehrstechnisch begleitet.

Es wurde deutlich, dass die Steuergeräte im Testgebiet der Landeshauptstadt Hannover und der Region Hannover nicht den erforderlichen technischen Standards entsprechen und daher eine Modernisierung erforderlich machen. Zur Erreichung der Ziele des LOGIN-Projektes war ein Austausch erforderlich. Die Modernisierung der jeweiligen Anlagen dauerten je nach Größe etwa 3 bis 5 Tage. Während dieser Zeit waren die Anlagen nicht mehr in Betrieb. Aufgrund der Vorschriften

der örtlichen Straßenverkehrsbehörde war es notwendig, mobile LSA anstelle der stationären LSA zu errichten. Einige Anlagen brauchten außerdem eine Erneuerung des Stromanschlusses. Die Projektkosten wurden durch diese unvorhersehbaren, erschwerenden und erforderlichen Maßnahmen erhöht.

Die Lieferanten haben die LSA-Steuergeräte unter Aufsicht der LHH und der Region Hannover in Betrieb genommen. Die Leistungen der Lieferanten wurden nach erfolgreichen Funktionstests, die auf einem ausgearbeiteten Kriterienkatalog basierten, abgerechnet. Auf der einen Seite verfügen die ausgewählten LSA-Steuergeräte an den Knotenpunkten über alle Schnittstellen für die Datenübertragung zu lokalen C-ITS-Komponenten, auf der anderen Seite über eine Verbindung zur Verkehrsrechnerzentrale und sind somit betriebsbereit für die Versorgung mit Signalprogrammen. Die Steuergeräte (Actros LS 4000, sX-Geräte) wurden mit aktueller Software ausgestattet, um RSU und Steuergerät miteinander zu verbinden. Außerdem wurde gewährleistet, dass die Firmware, die auf dem Steuergerät installiert ist, in der Lage ist, die neu erstellten Steuerungsfunktionen und -bibliotheken auszuführen.

AP 330: Anpassung von Signalprogrammen (Leitung: LHH)

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes hat der Projektpartner Schlothauer & Wauer (S&W) für zwei beispielhafte Lichtsignalanlagen mit einer neuen Priorisierungslogiken und -funktionen basierend auf SREM-Nachrichten erstellt. Diese prototypische Ausarbeitung der Steuerung war vor dem Übertragen der Steuerungslogiken auf weitere Knotenpunkte notwendig, um Stabilität und Inhalt der neuen Funktionen zu prüfen. Ausgewählt wurden die Anlage Ricklinger Stadtweg / Bahnhof Fischerhof (K122) im Stadtgebiet Hannover. Nach dem erfolgreichen Testen wurden die Ergebnisse auf die Anlage Hannoversche Str./ Kircher Str./ Lünb. Damm (8301) in der Region Hannover übertragen und im Anschluss an alle weiteren Anlagen in den drei SWARCO-Testgebieten.

Als erster Schritt in der prototypischen Projektierung der Anlage wurde eine detaillierte, georeferenzierte Beschreibung des Knotenpunktes/Lageplans, die MAP, erstellt. Im zweiten Schritt wurde, basierend auf der Bestandssteuerung, neue Logikbausteine entwickelt und getestet. Für die beiden Knotenpunkte wurde die Logik um die folgenden Funktionalitäten erweitert:

- 1) Umsetzung der Berücksichtigung der Informationen aus der SREM-Nachricht zur Priorisierung eines oder mehrerer ÖV-Fahrzeuge
- 2) Integration der ÖV-Fahrzeu glänge (Veränderung Phasenübergänge) im Fall eines sich mittels SREM anmeldeten Fahrzeugs
- 3) Aufbau der verkehrabhängigen Logik sodass sowohl konventionelle Priorisierung mit einem R09 Telegramm als auch SREM-Priorisierung von der Lichtsignalanlage berücksichtigt werden kann

4) Erarbeitung und Implementierung eines SSEM-Quittierungskonzeptes

Wie üblich in der Erstellung von verkehrabhängiger LSA-Steuerung, wurde die kompilierte Steuerungslogik im eigens um zusätzliche Testfunktionalitäten erweiterten Testplatz des Verkehrsingenieurarbeitsplatzes LISA mit einem virtuellen Steuergerät und einer virtuellen RSU ausführlich getestet. Da es sich um neue Funktionen handelt, wurden selbstverständlich die Rückmeldungen aus dem Feldtest berücksichtigt und ggf. Änderungen eingearbeitet. Abbildung 10 zeigt einen beispielhaften Auszug aus der Steuerungslogik des Knotenpunktes Ricklinger Stadtweg / Bahnhof Fischerhof (LSA 122).

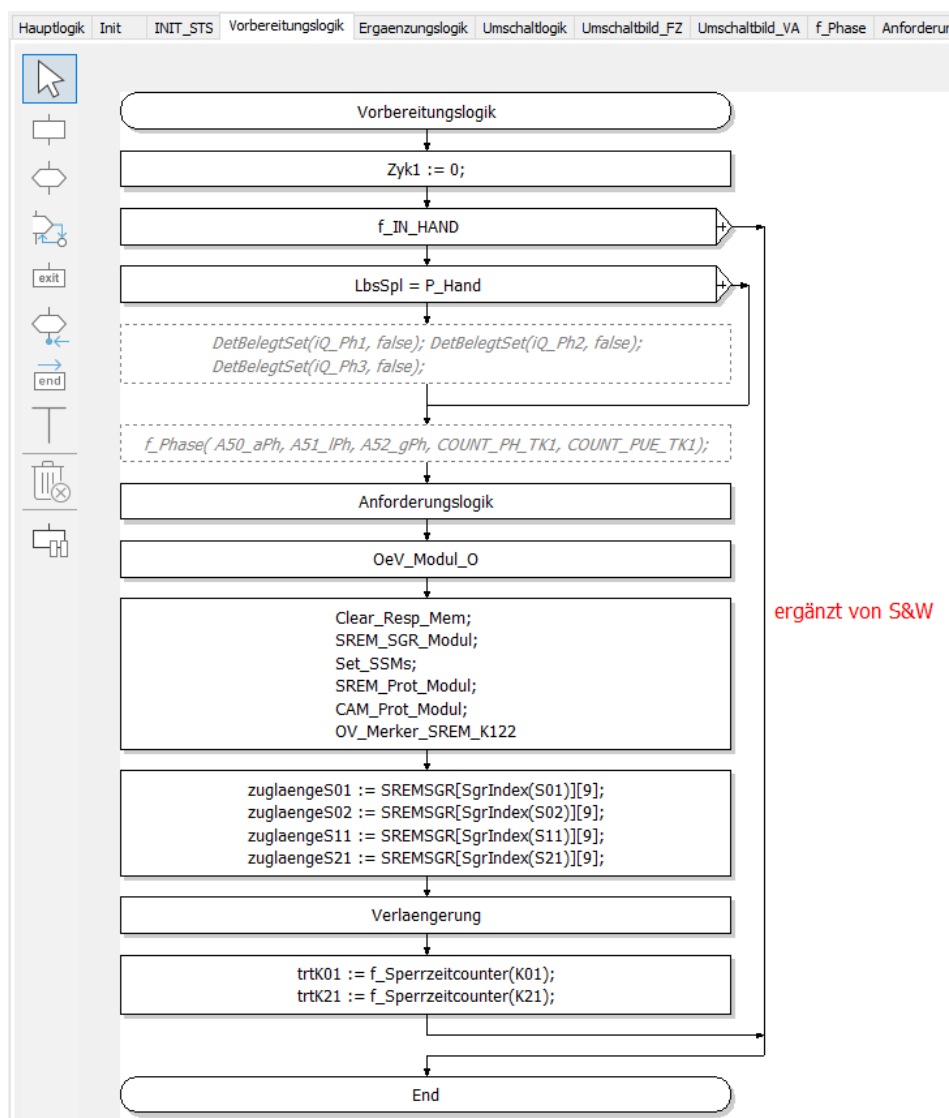


Abbildung 10: Auszug aus der Logik der Lichtsignalanlage Ricklinger Stadtweg / Bahnhof Fischerhof (LSA 122)

Die Erstellung von MAP-Dateien erfolgte auf Grundlage des Signalprogrammmentwurfs, wobei die mit C-ITS-Komponenten ausgestatteten ÖV-Fahrzeuge diese zur Orientierung nutzen. Die MAP-Dateien sind über RSU ausgestrahlt und dienen den Fahrzeugen zur Auswahl des richtigen Signalgebers sowie zur Bestimmung der Entfernung zur Haltlinie während des Anmeldeprozesses. Bezüglich der Erstellung der MAPs gab es zwei Varianten; in der ersten Variante beauftragte die Region

Hannover den zuständigen Signalbauhersteller und in der zweiten Variante wurden die Maps in einer Eigenleistung durch die LHH erstellt. Im Arbeitsschritt der Inbetriebnahme und Abnahme wurde die Signalprogramm-Software am Testplatz von LHH und ÜSTRA bzw. von Region Hannover und ÜSTRA geprüft und abgenommen. Die LSA-Steuergeräte wurden mit den bereitgestellten Signalprogrammen versorgt. Die Abnahmen der Vorort versorgten Signalprogramme wurden basierend auf einem im Vorfeld erarbeiteten Kriterienkatalog durchgeführt. Nach erfolgreicher Abnahme wurden die LSA im Betrieb genommen. Die Entwicklung neuer LSA-Steuerungsfunktionen, die Berechnung und Versorgung der Estimated Time of Arrival (ETA), die Erstellung von MAP-Dateien sowie die Beschaffung der Bestandsdaten waren die Hauptaufgaben, die im Rahmen dieses Arbeitspakets durchgeführt wurden. Dies führte zu dem Ergebnis, dass die C-ITS-fähigen Signalprogramme sukzessive an jedem Knotenpunkt in Betrieb genommen wurden und im Pilotbetrieb unter realen Bedingungen getestet werden konnten. Im Rahmen eines Leitfadens wurden die Ergebnisse dokumentiert und festgehalten.

AP410: Signalisierungs- und Fahrstrategien (Leitung: UKS)

Für die Erprobung der entwickelten Fahrstrategien und zur Entwicklung von ETA-Berechnungsmethoden wurde ein testfeldunabhängiges Referenzmodell entwickelt. Das testfeldunabhängige Referenzmodell beinhaltet einen plangleichen Knotenpunkt mit vier Knotenpunktarmachsen und einer verkehrabhängigen Lichtsignalsteuerung. Für die Entwicklung und Erprobung einer Fahrstrategie wurden ÖV-Fahrzeuge von einer Seite in das Simulationsnetz gesetzt über einen Signalgeber im Mischverkehr geführt. Als Datenbasis wurden zunächst 100 Simulationsläufe mit je 4000 Simulationssekunden durchgeführt. Hierbei dienten die ersten 400 Simulationssekunden der Befüllung des Netzes mit Fahrzeugen des MIV. Es wurden zwei verschiedene Szenarien betrachtet, welche sich lediglich in der Zuflussmenge der MIV-Fahrzeuge auf derselben Strecke bezogen (1800 Fzg/h und 1200 Fzg/h). Um eine ausreichend große Menge an Fahrtverlaufsdaten als Datenbasis für spätere Forschungsvorhaben zu generieren, wurden ab der Simulationssekunde 400 alle 50 Sekunden ein weiteres ÖV-Fahrzeug auf die entsprechende ÖV-Route gesetzt. Der genaue Einsetzzeitpunkt variiert hierbei im Bereich +/- 25 Sekunden, sodass sich keine wiederkehrenden Muster im Fahrtverlauf in Bezug auf die Umlaufzeit der LSA einstellen. Insgesamt wurden somit 72 Fahrzeuge je Simulation und somit insgesamt 7200 Fahrzeuge samt der Fahrtverlaufsdaten erzeugt. Die ÖV-Fahrzeuge unterlagen innerhalb des Simulationsmodells keiner ÖV-Bevorrechtigung.

Gesammelte Daten

Für die Prognose von der Ankunftszeit (ETA = Estimated Time of Arrival) eines ÖV-Fahrzeugs an einer Haltlinie des Signalgebers können historische Fahrtverlaufsdaten verwendet werden. Hierfür wurden während aller Simulationsläufe folgende Fahrtverlaufsdaten sekundenweisen mitgeschrieben:

- Simulationsnummer
- Startzufallszahl der Simulation
- Simulationssekunde
- Simulationszeit
- FahrzeugID
- ÖV-Linie
- GPS (Latitude, Longitude, Bearing)
- Geschwindigkeit [m/s]
- Wunschgeschwindigkeit [m/s]
- Beschleunigung / Verzögerung [m/s²]
- Entfernung zur LSA
- Aktueller Signalisierungszustand der LSA (Signalgeber 1-6)

Weiterhin ist für die Entwicklung und Anwendung von Fahrstrategien eine Schaltzeitprognose (SZP) der LSA notwendig. Als Datengrundlage für diese SZP wurde während der gesamten Simulationszeit sekundlich die LSA-Signalbilder mitgeschrieben.

Fahrstrategie

Die Definition einer allgemeingültigen Fahr- und Haltstrategie ist nicht möglich. Vielmehr kann eine Vielzahl von Strategien je nach der zu erwartenden verkehrlichen Situation Anwendung finden. Für die verständliche Darstellung ist eine strikte Abgrenzung zwischen Fahrstrategie und Haltstrategie notwendig. Die Fahrstrategie adressiert das Fahrverhalten auf den Teilstrecken zwischen den POI (eng.: Point of Interest = Interessenspunkt), also Haltestellen oder Haltlinien von LSA. Der Kern der Fahrstrategie besteht darin, dem Fahrpersonal Geschwindigkeitsempfehlungen in der Zufahrt von Kreuzungen mit LSA zu geben und den Verkehrsfluss somit zu optimieren. Innerhalb des Simulationsmodells passt der Bus die Fahrgeschwindigkeit entsprechend den Empfehlungen nach den VISSIM-internen Fahrverhaltensmodell der Fahrstrategie (Wunschgeschwindigkeit) an und zielt somit auf die Vermeidung von Stopps an Kreuzungen ab. Die Fahrstrategien basieren auf Schaltzeitprognosen, welche speziell für das Simulationsmodell entwickelt wurden. Diese wurden auf Basis von Informationen wie der Fahrzeuggeschwindigkeit, Beschleunigung, Positionsabstand usw. sowie unter der Verwendung kinematischer Formeln entwickelt. Die Fahrstrategien wurden anhand von folgenden drei Simulationsmodellen getestet:

1. Referenzmodell ohne Bushaltestelle und ohne Bevorrechtigung
2. Knotenpunkt 127 mit R09-System mit Bushaltestelle
3. Knotenpunkt 123 mit C-ITS ohne Bushaltestelle

Unter Verwendung dieser drei Simulationsmodelle wurden verschiedene Fahrstrategien evaluiert.

Modelle zur Eingabedatenprognose

Für die Simulation der Anwendung der Fahrstrategien wurden eine Vielzahl an prognostizierten Eingabewerten benötigt. Hierzu zählen unter anderem die Ankunftszeit des ÖV-Fahrzeuges an der LSA, die Aufenthaltszeit des ÖV-Fahrzeuges an einer Haltestelle und die Rückstaulänge des Verkehrs vor einer LSA. Um für diese Größen zuverlässige Prognosewerte zur Verfügung zu haben, wurden mehrere Prognosemethoden entwickelt und ebenfalls auf die Prognosequalität hin evaluiert.

AP420: Schaltzeitprognose (Leitung: ifak)

Bereits das Projekt VERONIKA hat sehr deutlich gezeigt, dass die Qualität der benötigten Schaltzeitprognose (SZP) für den Erfolg der Fahrzeug-Infrastruktur-Kooperation von entscheidender Bedeutung ist. Der weit verbreitete Ansatz, zukünftige Freigabezeitpunkte allein anhand der Beobachtung von Schaltzuständen und Detektionseignissen vorherzusagen, stößt je nach Grad der LSA-Verkehrsabhängigkeit mehr oder weniger schnell an seine Grenzen. Daher hat das Vorhaben LOGIN-Hannover u. a. das wissenschaftliche Ziel verfolgt, die Prognosequalität mit KI-Methoden weiter zu steigern.

Die Vorhersage der Schaltzeit von Lichtsignalanlagen ist im Wesentlichen ein Problem der Zeitreihenvorhersage (d. h. zukünftige Werte können basierend auf den vergangenen Werten vorhergesagt werden). In AP420 wurden sechs hauptsächlich verwendete Methoden des maschinellen Lernens zur Zeitreihenvorhersage unter Nutzung der Bibliothek TensorFlow (<https://www.tensorflow.org/>) implementiert und miteinander verglichen:

- Baseline Model
- Linear Model
- Dense Model
- Convolutional Neural Network (CNN)
- Long Short-Term Memory Model (LSTM)
- Autoregressive Long Short-Term Memory Model (AR-LSTM)

Untersuchte Knoten

Zwei Knoten aus dem Testgebiet Hannover wurden näher untersucht: 125 – eine vierarmige Kreuzung Wallensteinstraße / Göttinger Chaussee – und 249 – eine 3-armige Kreuzung an der Einmündung der Tiergartenstraße in die Ostfeldstraße. An beiden Kreuzungen gibt es neben den Kfz-Fahrbahnen Fußwege, Radwege und Straßenbahngleise. Zahlreiche Detektoren erfassen den Verkehrsfluss.

Datenaufbereitung

Für das Training der Prognosemodelle wurden sekundlich aufgezeichnete Zustände der Detektoren und Signale der beiden Knoten verwendet. Pro Tag liegen somit 86.400 Datensätze (Zeilen) mit 171

Merkmale (Spalten) für den Knoten 125 vor. Dabei steht „G“ für ein grünes Signal, „A“ für ein Aufmerksamkeitssignal (gelb), „R“ für ein rotes Signal, „a“ für ein akustisches Signal für blinde und sehbehinderte Menschen, „D“ für ein Dunkelsignal und „S“ für ein Startsignal (rot-gelb) steht. Für das Training der Modelle wurde alle Merkmale in numerische Werte umgewandelt. Von diesen sind nur „G“, „a“ und „S“ Freigabesignale; sie wurden daher auf 1 gesetzt, die anderen auf 0. Um den Berechnungsaufwand für das Training der Modelle möglichst gering zu halten und um die Vorhersagegenauigkeit nicht zu beeinträchtigen, wurden alle Nullwerte, irrelevanten und redundanten Merkmale aussortiert. Die Merkmale der Knoten 125 und 249 sind naturgemäß unterschiedlich, so dass sie in Abhängigkeit vom Vorhersageziel weiter verfeinert wurden. Für Knoten 125 wurde als Vorhersageziel K01R gewählt. Als relevante Merkmale verblieben die Anforderungen („ANF“), Detektordaten („BK“), Notfallanforderungen („AFS“), Annäherungstimer („TAN“) und Meldepunkte („MPN“). Für Knoten 249 wurde K1 als Vorhersageziel ausgewählt; die relevanten Merkmale sind ähnlich wie bei Knoten 125, jedoch wurden die Anforderungen von Bussen einbezogen. Schließlich wurde die Anzahl der Merkmale von Knoten 125 auf 38 reduziert, die Anzahl der Merkmale von Knoten 249 auf 27. Für den gesamten Datenbestand wurden 70 % als Trainingsset ausgewählt, 20 % als Validierungsset und die restlichen 10 % für den Test.

Zeitfensterdefinition

Zur Vorhersage von Signalen wurde eine Sequenz-zu-Sequenz-Struktur als Zeitreihe verwendet. Das bedeutet, dass eine zukünftige Sequenz direkt mit einer beobachteten historischen Sequenz vorhergesagt werden kann. Dieses Sequenzvorhersageverfahren wird als direkte Prognosemethode mit mehreren Horizonten definiert¹. Hierbei muss die Länge der Eingangs- und Ausgangssequenz (Zeitfenster) definiert werden. Ein Beispiel für ein Zeitfenster ist in Abbildung 11 dargestellt, wobei die Eingabesequenz mit 120s (markiert durch blaue Punkte) und die Vorhersagesequenz mit 30s (markiert durch grüne Punkte) definiert ist. Die Größe des Zeitfensters beträgt dementsprechend 120s.

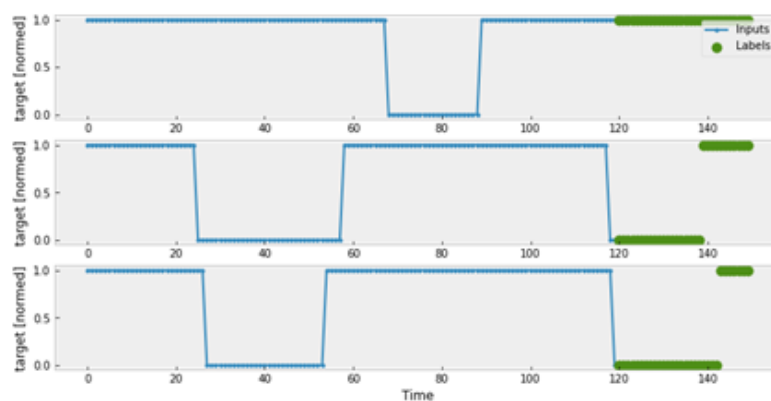


Abbildung 11: Definiertes Zeitfenster

¹ Lim, B. and Zohren, S. (2021). Time-series forecasting with deep learning: a survey. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 379(2194), 20200209.

Wurde zu einem bestimmten Zeitpunkt die Sequenz der zukünftigen 30s prognostiziert, schiebt sich das Zeitfenster um 30s weiter, um die nächste Sequenz vorherzusagen.

Vergleich der Modelle

Die sechs genannten Hauptmodelle des maschinellen Lernens zur Lösung von Zeitreihenvorhersageproblemen – Dense Model, Baseline Model, Linear Model, Convolutional Neural Network (CNN), Long Short-Term Memory (LSTM) Model und Autoregressive Long Short Term Memory (AR-LSTM) Model – wurden trainiert und die Prognosegenauigkeit an beiden Knoten verglichen. Hierbei wurde festgestellt, dass die Testgenauigkeit am weniger komplexen Knoten 249 bei allen Modellen signifikant höher ausfällt als an Knoten 125. Für den Knoten 125 liegen die Prognosegenauigkeiten der meisten Modelle bei etwa 93 %, LSTM übertrifft die anderen mit einer Genauigkeit von etwa 95 %. Bei Knoten 249 haben die meisten Modelle eine Genauigkeit von 98 %, wobei Linear Model und LSTM die besten Ergebnisse erzielen. Sogar AR-LSTM hat am Knoten 249 eine deutlich höhere Genauigkeit als am Knoten 125.

Insgesamt zeigte LSTM eine sehr gute und vor allem die stabilste Prognosequalität für beide Knoten. Um die Prognosequalität langfristig zu validieren, wurde LSTM daher mit größeren Datenmengen trainiert. Um die allmählichen Veränderungen der Vorhersagegenauigkeit zu beobachten, wurde der gesamte Datenbestand eines Monats in drei Mengen aufgeteilt, mit denen LSTM dann einzeln trainiert wurde. In Abbildung 12 sind die Ergebnisse von LSTM an den Knoten 125 und 249 für Mengen von 1 Tag, 10 Tagen, 20 Tagen und 28 Tagen dargestellt.

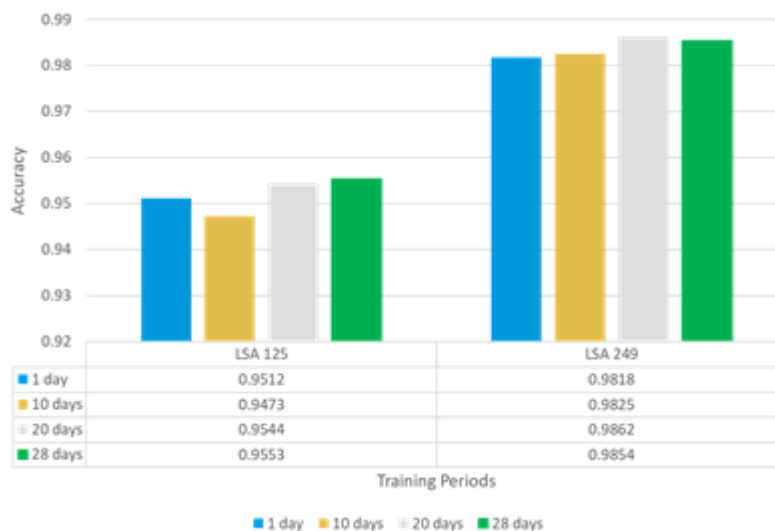


Abbildung 12: Prognosequalität von LSTM bei unterschiedlich großen Trainingsdatensätzen

Es kann festgestellt werden, dass die Prognosequalität nicht immer automatisch mit der Größe des Trainingsdatensatzes ansteigt. Beim Knoten 125 übertrifft die Genauigkeit des mit Ein-Tages-Daten trainierten LSTM das mit 10-Tages-Daten trainierte Modell. Für Knoten 249 besitzt das mit 20 Tagen trainierte LSTM die beste Vorhersagegenauigkeit. Dies könnte auf die unterschiedliche Größe der Testmenge zurückzuführen sein, da die Testmenge immer die letzten 10 % des angestrebten

Zeithorizonts ausmacht. Daher können die letzten 10% der 10-Tage-Daten und der 20-Tage-Daten völlig unterschiedlich sein. Langfristig sollte die Vorhersagegenauigkeit jedoch immer höher werden. Berücksichtigt man jedoch die proportional steigenden Kosten für das Training, so kann das Vorhersageergebnis des mit Ein-Tages-Daten trainierten LSTM die grundlegenden technischen Anforderungen in der Praxis erfüllen.

Schlussfolgerungen

Im Gesamtergebnis übertrifft die mit LSTM erreichte Prognosequalität die der anderen Modelle signifikant. LSTM erzielte eine Genauigkeit von über 95 % an Knoten 125 und eine Genauigkeit von ca. 98 % an Knoten 249. Es ist festzustellen, dass die Prognosequalität nach dem Training mit Daten eines Tages die grundlegenden praktischen Anforderungen erfüllen können. Knoten 125 ist komplexer als Knoten 249 und das nicht nur strukturell, sondern auch in Bezug auf die Merkmale. Es scheint, dass die Vorhersagegenauigkeit umso höher ist je einfacher die Struktur. Einer der Hauptunterschiede zwischen beiden untersuchten Knoten ist, dass der Knoten 125 keine Anforderungen von Bussen erhält, d. h., dass Busse an diesem Knotenpunkt nicht priorisiert werden. Dies ist jedoch wahrscheinlich nicht der entscheidende Faktor für die Vorhersagegenauigkeit. In Zukunft sollte der Einfluss der Busanforderungen weiter erforscht werden. Um den Vergleich zudem objektiver und fairer zu gestalten, müssen einheitlichere Testdatensätze gefunden werden.

AP430 V2I-Security (Leitung: ifak)

Die Gewährleistung einer sicheren V2I-Kommunikation ist für den Projektbetrieb und späteren Regelbetrieb erforderlich, um Störungen, Manipulationen und Cyberattacken weitestgehend auszuschließen oder zu erschweren. Das Ziel einer sicheren V2I-Kommunikation ist die Gewährleistung von Integrität und Authentizität, wobei die Integrität die Vollständigkeit und Richtigkeit der zum Empfänger übertragenen Informationen sicherstellt und die Authentizität die Berechtigung der Nachrichtenübermittlung zwischen den Kommunikationsteilnehmern gewährleisten soll. Grundsätzlich können diese Zielstellungen durch die Schaffung einer Sicherheitsarchitektur erreicht werden, die mit den Mitteln der asymmetrischen Kryptographie durch öffentliche und private Schlüssel sowie selbstsignierten Zertifikaten in Verbindung von definierten Applikationsberechtigungen für die teilnehmenden C-ITS-Stationen (RSU und OBU) ausgestattet ist. Diese Funktionalitäten werden von Public Key Infrastrukturen (PKI) bereitgestellt. Im Verlauf der Projektbearbeitung wurden verschiedene Wege eruiert, eine sichere V2I-Kommunikation zwischen den herstellergemischten ITS-Stationen zu gewährleisten.

Aufgrund der in verschiedenen Forschungsprojekten wie C-ROADS, BiDiMoVe, Aktivitäten von Organisationen wie der OCA, ODG der BSI sowie von Betreibern der Straßenbaulast in Kommunen, der Länder und dem Bund vorangetriebenem Aufbau verschiedener PKI wurde seitens des Konsortiums der Weg des Aufbaus einer weiteren eigenen PKI-ähnlichen Sicherheitsarchitektur nicht weiterverfolgt. Aufgrund der in der Stadt Hamburg im Projekt BiDiMoVe gesammelten

Erfahrungen beim Betrieb von PKI für kooperative ITS im innerörtlichen Straßennetz wurden vom Projektkonsortium Kontakte zum Betreiber der Straßenbaulast, dem Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer LSBG gesucht, mit dem Anliegen eine dort vorhandene und betriebene Pilot-PKI auch für das Projekt LOGIN zu nutzen. Die Gespräche verliefen erfolgreich, so dass seitens des LSBG der Bitte entsprochen wurde, eine Teilnahme an der PKI durch das Projekt LOGIN zu ermöglichen. Hierzu wurde zwischen der Freien und Hansestadt Hamburg und der Region Hannover und der Landeshauptstadt Hannover eine Nutzungsvereinbarung über einen Zeitraum von 4,5 Jahren abgeschlossen, um den Ausbau kooperativer Infrastruktur für C-ITS-Nachrichten sowie des Dialogs zwischen den Kommunen zu fördern.

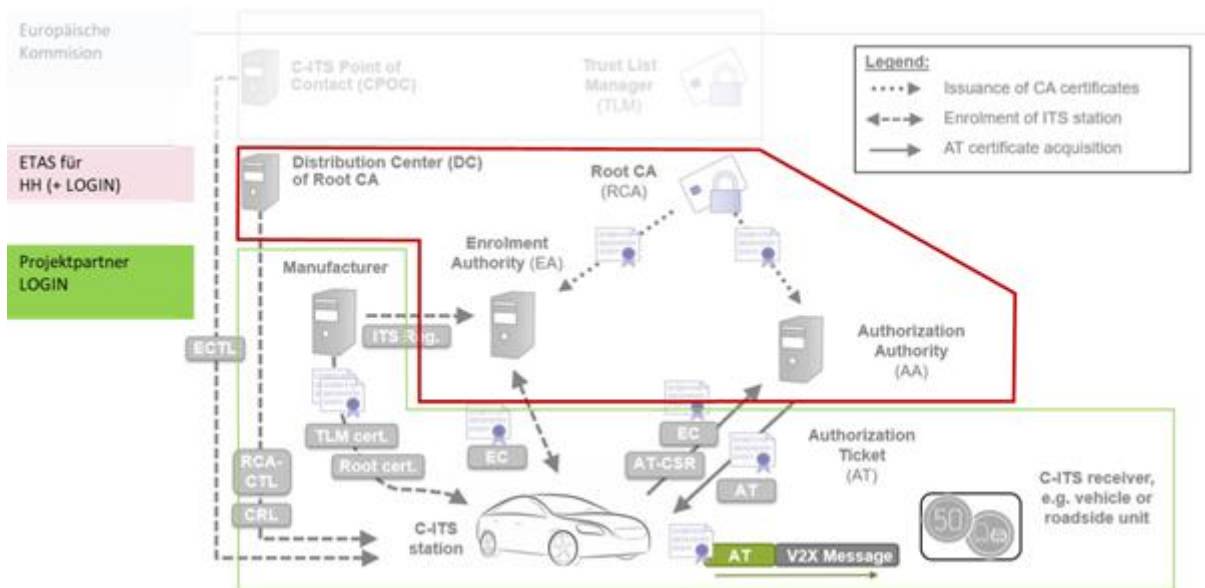


Abbildung 13: PKI-Operation mobiler und stationärer ITS-Stationen (Bilder: ETAS und eigene Darstellung)

In Abbildung 13 sind die für LOGIN genutzten und an der PKI beteiligten Instanzen mit den zum sicheren Nachrichtenaustausch benötigten Zertifikatsbeziehungen in ihrer hierarchischen Architektur dargestellt. Das Schema der PKI ist in drei Ebenen unterteilt, die verschiedene Verantwortungsbereiche darstellen.

Auf der oberen Ebene werden die Root CAs der in der EU bisher bekannten PKI (z.B. C-ROADS, Volkswagen, Atos und viele weitere PKI in allen Mitgliedsstaaten) über den Trust List Manager (TLM) verwaltet, um die Erweiterung der Vertrauensdomäne über die eigene PKI hinweg zu ermöglichen. Der TLM verwaltet die European Certificate Trust List (ECTL) in der alle vertrauenswürdigen Root CA Zertifikate enthalten sind und über den C-ITS Point of Contact (C-POC) bezogen werden. Die in LOGIN genutzte PKI besitzt das Operationslevel Level-0 welches für Forschungs-, /Test- und Integrationszwecke etabliert wurde und nicht gegen die EU-Referenzdokumente der Level-1 und Level-2 zertifiziert ist. Daher ist diese Verbindung in LOGIN nicht gegeben und in Abbildung 12 ausgegraut dargestellt. Lediglich die ECTL wird beim Registrieren einer ITS-Station ebenfalls bereitgestellt.

Die mittlere Ebene der Abbildung beinhaltet als grundlegendes Kernelement jeder PKI die Root Certificate Authority oder Root CA. Diese besitzt ein Root Zertifikat, mit dem weitere Zertifikate zum Betrieb der Enrolment Authority (EA) und der Authorization Authority (AA) signiert werden und somit eine Vertrauenskette (Trust Chain) bilden. Das Distribution Center (DC) dient der Verteilung der Certificate Trust List (CTL) und der Certificate Revocation List (CRL) an die ITS-Stationen, um ihnen vertrauenswürdige und zurückgezogene Zertifikate anderer externer RCAs bekannt zu machen. Die Instanzen dieser rot umrahmten Ebene werden von einem PKI-Dienstleister betrieben (für die genutzte PKI der Stadt Hamburg ist dies die Firma ETAS GmbH, ehem. ESCRYPT).

Eine EA dient zur Ausgabe von längerfristigen Zertifikaten (Enrolment Credential, EC), die über einen Zeitraum von mehreren Monaten gelten, für ITS-Stationen (OBUs und RSUs) bei der erstmaligen Anmeldung dieser Stationen an der EA sowie der Verlängerung der Nutzungsdauer nach Auslaufen von deren Nutzungsdauer. Die AA dient der Ausgabe von Kurzzeitzertifikaten (Authorization Tickets, AT), die in der Regel über einen Zeitraum von einer Woche gelten, die von ITS-Stationen dazu genutzt werden, ihre auszutauschenden Nachrichten zu signieren, um deren Authentizität und Integrität nachzuweisen. Die Kurzzeitzertifikate werden von der AA auf Bedarf automatisch bezogen, indem ein Authorization Ticket Certificate Service Request (AT-CSR) an die AA gerichtet wird, wenn eine mobile OBU oder stationäre RSU in Betrieb gehen und den Bedarf an zu erneuernden Zertifikaten feststellen.

In der unteren grün umrandeten Ebene sind die Hersteller von mobilen und stationären ITS-Stationen, der OBUs und RSUs als Partner des Projekts LOGIN eingeordnet. Damit ITS-Stationen an einer PKI teilnehmen dürfen ist es erforderlich, dass Hersteller von ITS-Stationen ein Manufacturer Certificate beim Betreiber der PKI beantragen und ihre jeweils berechtigten Personen sowie alle ITS-Stationen RSU und OBU an der PKI registrieren. Mit dem so erlangten Manufacturer Certificate können einzelne ITS-Stationen angemeldet werden, die über zuvor definierte Berechtigungen verfügen, in denen festgelegt ist, welcher Stationstyp welche Art von ITS-Nachrichten versenden darf. Während des laufenden Betriebs werden von den ITS-Stationen die zur Signierung der zu versendenden ITS-Nachrichten erforderlichen Kurzzeitzertifikate (Authorization Tickets) von der PKI fortlaufend bezogen und erneuert. Damit sorgt jede ITS-Station automatisch für ihre eigene Autorisierung. Beim Empfang einer Nachricht prüft in den jeweiligen ITS-Stationen der zur V2X-Kommunikation verwendete Software-Stack, ob diese mit einem Kurzzeitzertifikat der PKI signiert ist und prüft somit ihre Authentizität.

Die im Projekt LOGIN gesammelten Erfahrungen mit der Nutzung der PKI sind bezüglich der geringen Fehleranfälligkeit und Stabilität der Registrierungs-, Anmelde- und Autorisierungsprozesse gegenüber vorher durchgeführten C-ITS-Projekten als besonders positiv zu werten.

AP500: Testumgebung (Leitung: UKS)

Für die Entwicklung der Testumgebung wurden zunächst verkehrstechnische Unterlagen des Bestandssystems (ÖV-Anmeldung über R09-Telegramme) zur Verfügung gestellt. Diese umfassten neben dem Lageplan der Knotenpunkte ebenso Informationen zum Steuerprogramm der LSA. Die Informationen lagen größtenteils als Exporte aus dem Programm LISA+ vor. Anhand der gegebenen Informationen wurde zunächst das Netzmodell des Testgebiets „Ricklinger Stadtweg“ in PTV VISSIM entwickelt. Dieses umfasst einen Streckenzug aus sechs aufeinanderfolgenden Knotenpunkten und wird von Stadtbahnen sowie abschnittsweise ebenso von Bussen befahren.

Weiterhin wurden die LSA sowie die LSA-Steuerungen hinzugefügt. Dies umfasste bspw. die korrekte Lokalisation und Zuordnung aller Signalgeber, Detektoren, ÖV-Meldepunkte, Haltestellen, ÖV-Linien, Fahrzeugzuflüsse, Konfliktflächen sowie statistische Routenentscheidungen. In Abbildung 14 ist das Simulationsmodell des gesamten Ricklinger-Stadtwegs dargestellt.

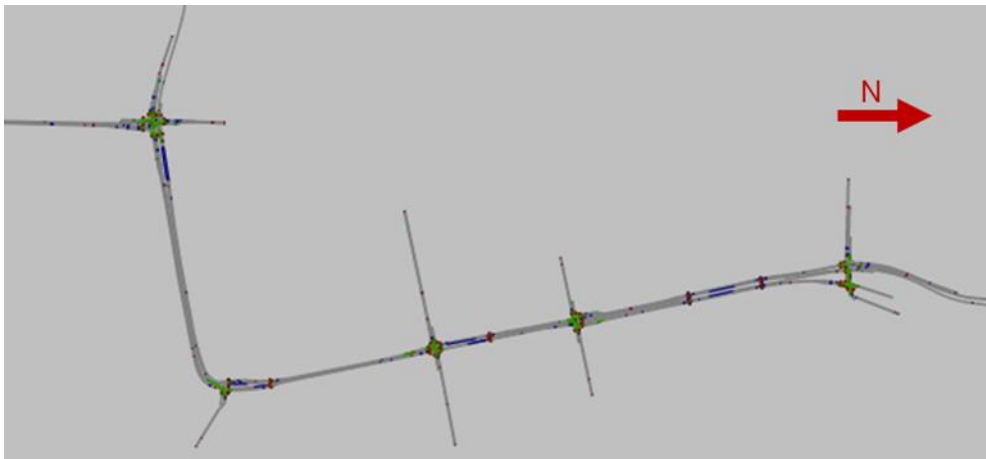


Abbildung 14: Simulationsmodell Ricklinger Stadtweg

Zur Integration in die Testumgebung wurde von der IVU eine Bordrechnersimulation zur Verfügung gestellt und mit den notwendigen Plandaten der ÜSTRA versorgt. Die C-ITS fähigen Steuerungen wurden erst zu einem späten Zeitpunkt im Projekt von den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Diese wurden für den Regelbetrieb im Testfeld in Hannover entwickelt und mussten folglich noch für die Simulationsumgebung angepasst werden. Aufgrund des verzögerten Projektverlaufs wurde sich darauf verständigt, das C-ITS im Simulationsmodell lediglich punktuell umzusetzen. Hierfür wurde die C-ITS Steuerungen zunächst umfangreich analysiert und die verkehrlichen Bedingungen der Bevorrechtigungen an den Knotenpunkten betrachtet. Es wurde sich schließlich dazu entschieden, Simulationen an den Knotenpunkten 127 (nur R09) und 123 (nur C-ITS) durchzuführen. Am Knotenpunkt 127 wurden zunächst Fahrstrategien getestet. Dies wurde ebenso am Knotenpunkt 123 durchgeführt.

AP600: Pilotbetrieb (Leitung: ÜSTRA)

Nachdem die Vorbereitungen der Fahrzeugausrüstung mit der Erstellung der Systemarchitektur bereits in AP100 begann, folgten die Entwicklung der OBE-Hardware. Nach Aufbau eines Prototyps folgte der erforderliche Zertifizierungsprozess, wie in AP210 beschrieben. Durch Kostensteigerungen musste das Ausstattungskonzept für Stadtbahnen angepasst werden. Statt der angestrebten zwei On-Board-Units pro Stadtbahnwagen wurde im finalen Konzept nur noch eine OBU verbaut. Folgend wurden Schnittstellen definiert und entwickelt bzw. ITCS-seitige Anpassungen für den Datenaustausch vorgenommen. Auch die Beschaffungen von OBE-Komponenten wurden im Rahmen der 12-monatigen Vorbereitungsphase des Pilotbetriebes geplant und durchgeführt.

Als Gegenmaßnahmen zu Verzögerungen wurde bereits 2022 mit Datenerhebung als Stand Alone Variante mit dem Smartphone begonnen. Nachdem zuvor bei mobilen Erhebungen die Smartphones durch Mitarbeitende der ÜSTRA mitgeführt wurden, um bereits zu diesem Zeitpunkt Fahrtverlaufsdaten sammeln zu können.



Abbildung 15: Angepasstes Vorgehen für die Erhebung von Evaluationsdaten

Es traten Verzögerung in der Fahrzeugausrüstung im Arbeitspaket durch eine erfolgte Cyber-Attacke ein. Im März 2023 wurde die ÜSTRA Opfer eines schweren Cyberangriffs für die Fahrzeugausrüstung ergaben sich hieraus eine Verzögerung von 3 Monaten, da die Arbeiten erst in der folgenden Quartalsplanung des für die Ausrüstung beauftragten Dienstleisters berücksichtigt werden konnten.

Der Einbau der Einzelkomponenten des On-Board-Equipments durch Fremdfirmen wurde durch fachkundige Betriebsbedienstete der Verkehrsunternehmen gesteuert, überwacht, geprüft und abgenommen. Die Lieferanten der Komponenten lieferten für den Einbau in Busse und Stadtbahnen entsprechende Unterlagen und Nachweise.

Das ursprüngliche Konzept des Pilotbetrieb sah 3 Phasen vor. Es wurden drei Abschnitte für den Pilotbetrieb mit je 2 Monaten Dauer geplant. In der ersten Phase wurde das Gesamtsystem OBE ohne scharf geschaltete C-ITS Priorisierung betrieben, in der zweiten Phase erfolgte die

Priorisierung mittels der entwickelten C-ITS Funktionen und die dritte Phase war für die Erprobung der Grünband Geschwindigkeitsempfehlung geplant. Für die letzte Phase konnte lediglich auf der erhobenen Datengrundlage eine Evaluation der Qualität der empfangenen Schaltzeitprognose erfolgen. Da aus zeitlichen und personellen Gründen keine weitere Version der App-Plattform zu Verfügung gestellt werden konnte. Die Koordination und Steuerung des Pilotbetriebs erfolgte in einem wöchentlichen Planungsmeeting. Die Durchführung des Pilotbetriebs wurde von den Betreibern der mobilen und stationären Systemkomponenten koordiniert und gesteuert. Anhand eines erarbeiteten Prozesses wurden der Fahrzeugeinsatz und die Funktionsüberwachung der C-ITS-Komponenten durchgeführt.

Für die Entstörung im Gesamtsystem überwachten alle beteiligten Partner ihre im Projekt konzipierten Komponenten und Prozesse im täglichen Betrieb. Sie griffen ein, wenn Störungen auftraten und stellten so die Durchführung des Pilotbetriebs sicher. Die Entstörung gestaltete sich teilweise langwierig und der Prozess der iterativen Fehlerbehebung führte zu einer Reduzierung der gesammelten Daten. Es erfolgte die Aufzeichnung von Prozessdaten für die Evaluation. Der empirische Teil der Evaluationsarbeiten ist auf Realdaten der verkehrstechnischen Systeme angewiesen. Hierfür wurden LSA-Prozessdaten und ÖV-Daten z. B. aus dem ITCS an das OBE und folgend an den Datenserver der Universität Kassel übertragen. Folglich wurden Daten für die wissenschaftliche Begleitung im AP 700 bereitgestellt. Diese entsprachen, durch die oben beschriebenen Verzögerungen, jedoch nicht dem ursprünglich angestrebten Umfang.

AP700: Evaluation (Leitung: UKS)

Die funktionale und verkehrliche Qualität der entwickelten Verfahren und Algorithmen sowie die Leistungsfähigkeit und der Stabilität des Gesamtsystems können über Kenngrößen diverser Kategorien bewertet werden. Folgend einer Auflistung verschiedener Kenngrößen, welche in der Evaluation betrachtet werden sollten:

- Technische Qualität
 - Übertragungsrate (Technische Fehler; Empfangsradien)
 - Latenzzeiten (Smartphone/OBU und OBU/RSU)
 - Ausfallhäufigkeit/ Verfügbarkeiten
 - Genauigkeit der GPS-basierten Abmeldung
- Verkehrliche Qualität
 - Zeitverhalten (Reisezeiten; Räumzeiten; Wartezeiten)
 - Geschwindigkeitsverhalten / Fahrtverlauf (Bremsmanöver; Geschwindigkeitsverlauf/Beschleunigungsverlauf; Anzahl der Halte; Rückstaulänge)
 - Emissionen

- Prognose / Situative Genauigkeit der Freigabezeiten
 - Anteil der erfolgreichen Bevorrechtigungen
 - Genauigkeit der ETA
 - Genauigkeit der Schaltzeitprognose
 - Haltestellenaufenthaltszeitprognose

Aufgrund der Verzögerungen zum Start des Pilotbetriebs und einem damit einhergehenden spätem Beginn der Evaluation konnten nur ausgewählte Kenngrößen betrachtet werden.

Verkehrliche Qualität

Die Bewertung der verkehrlichen Qualität konzentriert sich auf verschiedene Aspekte des Verkehrsverhaltens und der Effizienz, die durch die Implementierung der V2I-Kommunikationstechnologien beeinflusst werden. Diese Analyse zielte darauf ab, die Auswirkungen der neuen Systeme auf die Reisezeiten, das Geschwindigkeitsverhalten, die Anzahl der Halte und die Emissionen zu untersuchen. Um die Effektivität der Maßnahmen zur Optimierung des Verkehrsflusses und zur Reduktion von Energieverbrauch und Emissionen zu bewerten, wurden vier Datenphasen miteinander verglichen:

- Phase 1: Daten vor der Einführung des C-ITS-Systems, in der nur das R09-System genutzt wurde.
- Phase 2: Daten nach der Einführung des C-ITS-Systems, in der das C-ITS-System offiziell in Betrieb genommen wurde.
- Phase 2 SSM: In Phase 2 erfolgreich empfangene SSM-Nachrichten, unabhängig davon, ob diese als "accepted" oder "rejected" gekennzeichnet sind.
- Phase 2 SSM ACC: Alle in Phase 2 empfangenen "accepted" SSM-Nachrichten.

Die Daten der Phase 2 wurden erneut unterteilt, da es zu Beginn dieser Phase und auch während der gesamten Phase an Teilen der Anlagen und in gewissen Zeitabschnitten zu technischen Problemen kam, während welcher das R09-System als Rückfallebene eingreifen musste. Die Ausfälle des C-ITS waren dem Entwicklungsprozess geschuldet und zu erwarten. Da aber in der Evaluation unter anderem auch das stabil laufende C-ITS untersucht werden sollte, wurden die Datensätze dahingehend gefiltert. Da es neben Komplettausfällen aber auch technische Probleme im laufenden C-ITS Prozess gab, bei denen zwar C-ITS Nachrichten versandt wurden, aber keine Bevorrechtigung erteilt werden konnte ("rejected" SSM), wurden diese Daten für einen dritten Datensatz aussortiert. Aufgrund der Tatsache, dass nur in Teilbereichen zuverlässig erfolgreiche SSM-Nachrichten empfangen wurden, wurden für den Vergleich lediglich die Daten entlang etwas mehr als 20 Knotenpunkt-Zufahrten ausgewählt.

Die Ergebnisse der Evaluation der Kenngrößen aus dem Bereich der Verkehrlichen Qualität, welche ausführlich im Teilvorhabenabschlussbericht der Universität Kassel dokumentiert sind, zeigen, dass

durch die Einführung des C-ITS die relevanten Kenngrößen größtenteils unverändert geblieben sind. Dies bedeutet, dass Kenngrößen wie die mittlere Reisezeit oder mittlere Staulänge nach Einführung von C-ITS denen vor der Einführung ähnelten. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Ergebnisse des C-ITS in der Testphase mit denen von R09 vergleichbar sind, ob wohl die Parameter des R09 Systems in Hannover über einen langen Zeitraum hinweg optimiert wurden. Sollten die ursprünglich geplanten Fahrstrategien aufbauend auf dem C-ITS umgesetzt werden, so ist davon auszugehen, dass dieses die Kenngrößen der verkehrlichen Qualität verbessern.

Meilenstein Nr.	Erreichung im Projektmonat Soll/Ist	Ziel / Benennung	Bewertung / Erläuterung
1	Soll: 9 / Ist: 11	Grobspezifikation ist dokumentiert.	Erreicht mit 2 Monaten Verzögerung
2	Soll: 18 / Ist: 20	Prototypen von OBU und RSU sind an einem Beispielknoten betriebsbereit.	Erreicht mit 2 Monaten Verzögerung
3	Soll: 27 / Ist: 39	Gesamtsystem ermöglicht erste Feldmessungen.	Erreicht zum 13.02.2024 Ausgenommen PKI

Tabelle 5: Vergleich der Meilensteine Soll/Ist

b) Darstellung und Begründung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Neben den erforderlichen personellen Ressourcen waren die Ausrüstung der Testgebiete mit C-ITS RSU sowie die Ausrüstung der ÖV-Fahrzeuge für den Pilotbetrieb wichtige Kostenpositionen im Projekt. Für die Ausrüstung der Testgebiete beliefen sich die Gesamtkosten auf rund 1.029.818,59 € und durchschnittlich beliefen sich somit die Ausstattungskosten auf 54.200,98 € je Lichtsignalanlage.

Auf der Fahrzeugseite ergaben sich Kosten von rund 136.936,23 € für die Ausrüstung. Hierbei ist zu beachten, dass ein Teil der Fahrzeuge vorausgestattet, beschafft wurden. Die entstandenen Kosten lassen sich nicht trennscharf zu anderen Nutzungen abgrenzen und wurden somit nicht in den Kosten berücksichtigt.

Eine detaillierte Kostenaufstellung ist in den Teilvorhabenabschlussberichten erstellt worden und kann diesen entnommen werden.

Gesamtkosten für 14 LSA (LHH): 701.636,90€

Bestehend aus:

- LSA Modernisierung
- VRS Anschluss
- RSU an der LSA
- RSU Zentrale
- Anpassung der Signalprogramme
- Verkehrsrechner Upgrade
- Schnittstelle Schaltzeitprognose

Die Kosten für eine LSA belaufen sich dabei auf ca. 50.000,00 €.

Gesamtkosten für 5 LSA (Region Hannover): 328.181,69 €

Bestehend aus:

- LSA Modernisierung inkl. umfangreiche Verkehrssicherungsmaßnahmen
- VRS Anschluss
- RSU an der LSA
- Verkehrserhebungen
- Anpassung der Signalprogramme
- Schaltzeitprognose

Die Kosten für eine LSA (RH) belaufen sich dabei auf ca. 65.000,00 €

Geräte und Einbau fahrzeugseitig:

- Stadtbahn 43.690,85 € (brutto)
- Uni 4.587,45 €
- Halterungen ca. 3180 €
- Smartphones 6.178,78 €
- Regiobus 10.846,85 (brutto)
- Halterungen ca. 1.590 €
- OBUs: 75.570 € (netto)

c) Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit (ÜSTRA)

Die geleistete Arbeit entspricht den im Projektantrag dargestellten Aufgaben. Diese wurden mit dem Förderbescheid bewilligt. Zusätzlich erforderliche Arbeiten beispielsweise für die Zertifizierung der Hardware oder die Anpassungen für eine PKI-basierte Signierung der C-ITS Nachrichten wurden unter zusätzlichem Ressourceneinsatz verfolgt. Für die Erfüllung des durchgeführten Vorhabens war die geleistete Arbeit somit notwendig und angemessen.

d) Darstellung des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Wirtschaftliche Verwertung

Für das ifak besteht ein Gegenstand der weiteren Bereitstellung und Weiterführung von ausgewählten Arbeiten an den OBUs in der regelmäßigen Prüfung auf Funktionalität und Aktualität der PKI-Zertifikate sowie, falls notwendig, die Durchführung der Funktionsertüchtigung und das regelmäßige Monitoring der ITS-Stationen auf der Grundlage einer Vereinbarung mit der ÜSTRA. So erhält zur Datenauswertung für Tests und Forschungsarbeiten sowie zur Begleitung und zum Monitoring behält das ifak die Möglichkeit des Zugriffs auf alle Geräte vom Typ ifak C-ITS OBU. Die Daten der vorgenannten Geräte können somit seitens des ifak für die weitere Validierung nach Abschluss des Projekts sowie für Forschungszwecke genutzt werden. Für die weitere Vermarktung der ifak C-ITS OBU nach Projektabschluss wird ein Lizenzmodell angestrebt.

Für die IVU ist mit einem großen Interesse, vor allem von Bestandskunden, an der im Projekt entwickelten Lösung für die moderne ÖPNV-Bevorrechtigung mittels C-ITS-Kommunikation zu rechnen. Die integrierte Lösung innerhalb der Standardsoftware der IVU ist dabei ein besonderer Vorteil. Um diesen auch langfristig nutzen zu können, ist eine baldige Umsetzung noch notwendiger Anpassungen und entsprechender Tests der Funktionalitäten im laufenden Betrieb der ÜSTRA essenziell und geplant.

Eines der Hauptgeschäftsfelder von SWARCO im urbanen Bereich ist die Ausstattung und Wartung von Knotenpunkten mit Lichtsignalanlagen und deren Steuergeräten. Durch den bevorstehenden Wegfall der für R09-basierte Priorisierung vorgesehenen Funkfrequenzen entsteht in vielen Kommunen ein Bedarf an Alternativlösungen. Die in diesem Projekt erworbenen Erkenntnisse der Bevorrechtigung mit SREM/SSEM sind in das aktuelle ACTROS-Steuergeräte Betriebssystem (G5td) und die RSU-Software (ab Version 1.8) eingeflossen. SWARCO erwartet, dass in Zukunft viele Städte und Gemeinden auf C-ITS-Technologie setzen werden, wodurch sich ein großes Modernisierungspotenzial ergibt.

Wissenschaftliche / Technische Verwertung

Die Projektpartner ÜSTRA, Landeshauptstadt Hannover, Region Hannover und regiobus streben eine dauerhafte Verwertung der gewonnenen Erkenntnisse sowie nach Möglichkeit den flächenhaften Einsatz der entwickelten Technik an. Mit der Pilotierung wurden die Potentiale und Kosten einer flächendeckenden Umsetzung besser abschätzbar. Das Vorhaben schuf damit eine Basis zur Umsetzung bislang nicht erkannter Möglichkeiten im Bereich der ÖPNV-Vorrangschaltung nicht nur für Hannover, sondern auch für andere Städte. Mit der Umsetzung des C-ITS-Dienstes GLOSA, wird nach Abschluss des Projektes von einer Energieeinsparung durch reduzierte Bremsvorgänge und der damit verbesserten von CO₂-Bilanz ausgegangen. Insgesamt trägt die C-

ITS Bevorrechtigung zu einer Attraktivitätssteigerung des ÖPNV bei. Insbesondere konnte die Zufriedenheit von Fußgängern und Radfahrenden, durch eine verbesserte Signalsteuerung mit optimierten Freigabezeiten gesteigert werden. Das Konsortium hat über den veröffentlichten Leitfaden die Erfahrungen aus dem Vorhaben für andere Kommunen zugänglich gemacht. Insgesamt tragen die Projektergebnisse damit zu einer Reduzierung der Verkehrs- und Umweltbelastungen in Hannover und weiteren Städten bei.

SWARCO hat die in dem Projekt erarbeiteten Ergebnisse bereits in seine Produkte eingebaut. Das Projekt hat bewiesen, dass das Konzept der direkten und lokalen Kommunikation zwischen RSU und Steuergerät tragfähig und erweiterbar ist. Besonders wertvoll ist, dass die eingesetzte Bevorrechtigungslösung nicht nur auf standardisierte Nachrichten (SREM/SSEM und CAM) setzt, sondern auch darauf verzichten konnte, die in den Nachrichten befindlichen Datenfelder ihrem Zweck zu entfremden, um z.B. auf vermeintlich vereinfachtem Weg Zusatzinformationen einzubetten. Somit ließen sich die Projektergebnisse ohne Weiteres in ein Produkt übertragen, das aktuell schon in Kundenaufträgen Verwendung findet.

Nach Projektende wurden die Ergebnisse dauerhaft in den Verkehrsingenieursarbeitsplatz LISA von Schlothauer & Wauer integriert. Damit wird es zukünftig erstmals möglich sein, bei der Planung von signalisierten Knotenpunkten auch die Bedürfnisse der technologischen Weiterentwicklung der Priorisierung der ÖPNV-Fahrzeuge zu berücksichtigen. LSA-Planungen powered by Schlothauer & Wauer bleiben somit auch in Zukunft anschlussfähig an die technischen Randbedingungen der Verkehrsinfrastruktur. Durch die Anreicherung der Funktionsbibliothek durch die im Projekt entwickelten Funktionen wird ein Alleinstellungsmerkmal im Sektor Projektierung von LSA-Steuerungen erzielt. Durch Marketingaktivitäten und vor allem auch die hauseigenen Schulungen und die Präsentation auf der INTERTRAFFIC 2024 Amsterdam wurden die neuen LISA-Features bereits beworben.

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse wurden innerhalb der Projektlaufzeit in diversen Konferenzen vorgestellt und veröffentlicht:

- Poster-Session auf dem FGSV-Kongress (2022): Fahrzeitprognose für die ÖPNV-Beschleunigung bei Rückstau an LSA
- Poster-Session & Publikation auf dem Wissenschaftsforum Duisburg (2022): Public Transport Prioritization in Consideration of Congestion
- Publikation Artikel in Springer Fachbuch: Present Approach to Traffic Flow Theory and Research in Civil and Transportation Engineering (2022, Naumann et al., ifak): Application and comparison of machine learning algorithms in traffic signals prediction.
- Vortrag auf dem 17. VIMOS Symposium an der TU Dresden (2022, Czogalla, ifak): C-ITS Funktionen für ÖPNV und Straßenverkehr im Projekt LOGIN Hannover

- Workshop Mittelstand Digital Zentrum Magdeburg (2023, Czogalla, ifak): V2X Applikationen in Kommunen – Fahrzeug zu Infrastruktur Kommunikationen im Verkehrsmanagement
- Publikation & Vortrag auf dem 29. ITS World Congress (2023, Xie, ifak): Machine learning in traffic signals prediction: Two intersections in Hanover.
- Publikation in Journal Sensors (2023, Xie et al., ifak) Machine learning model application and comparison in actuated traffic signal forecasting.
- Publikation & Vortrag auf dem Wissenschaftsforum Duisburg (2023): Einsatzbereiche eines mobilen Endgerätes im Kontext der Modernisierung eines ÖV-Bevorrechtigungssystems
- Publikation & Vortrag auf dem 4 th IEEE Forum for Innovative Sustainable Transportation Systems (FISTS, 2024): Comparison of models for the prediction of travel time for public transport prioritization
- Publikation & Vortrag auf dem 30 th ITS World Congress (2024): An Adaptive Speed Advisory Algorithm based on regularly updated Switching Time Predictions

e) Darstellung der durchgeführten öffentlichkeitswirksamen Maßnahmen (z.B. Teilnahmen an Messen und Tagungen, Pressespiegel etc.)

Das Vorhaben wurde durch unterschiedliche Maßnahmen öffentlichkeitswirksam präsentiert. Neben Vorträgen zu den Projekthalt bei Veranstaltungen, die ein Fachpublikum adressierten, erfolgten auch Maßnahmen, die sich an die breite Öffentlichkeit richteten. So wurden neben verfassten Pressemitteilungen, die von der lokalen Presse und bundesweiter Fachpresse aufgegriffen wurden. Die folgende Tabelle beinhaltet eine Übersicht über die erfolgten Teilnahmen an Messen und Tagungen, Pressemitteilungen:

Titel	Partner	Datum	Bemerkung
Pressemitteilung "Projektankündigung"	Alle	09/2021	
Vorstellung im Bauausschuss LHH	ÜSTRA	17.03.2021	Projektvorstellung öffentlicher Teil
Tag der Niedersachsen	ÜSTRA	12.06.2022	Stand mit Bus
Deutscher Straßen- und Verkehrskongress 2022	Uni Kassel	01.09.2022	Poster-Ausstellung
Europäische Mobilitätswoche	LHH, ÜSTRA	16.-19.09.2023	Stand mit Poster u. Folien
Pressemitteilung "Pilotbetrieb"	Alle	12/2023	
C-ITS Forum FFM	Swarco, S&W, LHH, IVU, ÜSTRA	27.-28.02.2024	Vorstellung einzelner Projektergebnisse durch Partner.
IVU Anwenderforum	IVU	14./15.03.2024	Stand mit Vorstellung
Fahrgastfernsehen	ÜSTRA	04/2024	Darstellung mit Video
LOGIN Abschlussveranstaltung	Alle	27.05.2024	

Tabelle 6: Übersicht der öffentlichkeitswirksamen Maßnahmen