BUS2DATA

Gemeinsamer Sachbericht

MAT.TRAFFIC stadt aachen ASEAG

1. Kurzdarstellung 4
1.1. Aufgabenstellung 4
1.2. Vorraussetzungen 6
1.3. Planung & Ablauf 7
1.4. Wissenschaftliche Ausgangslage 8
1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen 10
1.5.1 Projektpartner 10
1.5.2 Veranstaltungen 11
2. Eingehende Darstellung 11
2.1. Verwendung der Zuwendung & erreichte Ziele 12
2.1.1 Straßenseitige Infrastruktur 12
2.1.2 Fahrassistenzsystem 13
2.1.3 Backend 19
2.1.4 Qualitätsanalyse 22
2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 26
2.3. Notwendigkeit & Angemessenheit der geleisteten Arbeit 26
2.4. Nutzen & Verwertbarkeit 27
2.5. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 27
2.6. Veröffentlichung der Ergebnisse 27

1. Kurzdarstellung

1.1. Aufgabenstellung

Dieses Projekt verfolgt die zentralen Ziele, eine bidirektionale C2X-Kommunikation zwischen ÖPNV und Infrastruktur in einem signalisierten Streckenabschnitt der Stadt Aachen zu erproben, die erweiterten ÖV-Betriebsdaten an zentraler Stelle zu sammeln und auf öffentlichen Datenplattformen zur Verfügung zu stellen, die ÖPNV-Bevorrechtigung in der Stadt online zu überwachen und eine erweiterte Qualitätsanalyse auf Basis der erweiterten Betriebsdaten durchzuführen. Es ist als Machbarkeitsstudie zu einem größeren Projekt gedacht, welches eine neuartige verkehrsabhängige Steuerung auf Basis SREM und SSEM nutzt und darauf zugeschnittene verkehrsabhängige Ampelsteuerungen zur ÖPNV-Bevorrechtigung im Regelbetrieb nutzen wird. Für diese Machbarkeitsstudie wird eine TRL-Stufe 6 (Technology Demonstration) realisiert. Es sollen insbesondere folgende Ziele erreicht werden:

Projektziele	**Wirkung**
Erweiterte ÖPNV-Betriebsdatenbasis.	Stadtweites Online-Monitoring der ÖPNV-Bevorrechtigung und verbessertes Qualitätsmanagement im Kontext Busbevorrechtigung.
Status- / Betriebsdaten in öffentlichen Datenplattformen.	- Basis für neue Geschäftsmodelle und Lösungen (Apps) - Veröffentlichung von relevanten Informationen (Transparenz)
Einbettung bekannter R09 Telegramme in die C2X-Kommunikation.	Kein Analogfunk mehr nötig bei Beibehaltung der existierenden verkehrsabhängigen Steuerungen.
Bidirektionale Kommunikation (C-ITS) zwischen LSA und Testfahrzeugen der ASEAG.	ÖPNV-Meldepunktanforderungen, Grünbandanzeige und Geschwindigkeitsanzeige → Leistungsfähigere ÖPNV-Bevorrechtigung mit verbesserten Reisezeiten und weniger Verlustzeiten.
Leitfaden für die Übertragung des entwickelten C2X-Ansatzes auf andere Städte / Regionen.	Übertragbarkeit und Austausch der Erkenntnisse und Erfahrungen.

Das Gesamtsystem soll folgende Subsysteme umfassen:

Straßenseitige Infrastruktur

Die benötigten standardisierten Nachrichten (CAM, SPaT, MAP, DENM, ...), die zwischen LSA und Bus ausgetauscht werden, werden von der zugekauften RSU codiert und gesendet bzw. decodiert und empfangen. Weiter existiert bereits eine Schnittstelle zwischen dem Steuergerät der LSA und der RSU, um Statusdaten der Ampeln weiterzugeben. Es wird aber zusätzlich eine Software spezifiziert und implementiert, die die empfangenen Anforderungen der Busse in die bekannten Meldepunktanforderungen übersetzt und weiterleitet, so dass eine Abwärtskompatibilität mit den etablierten Meldepunktverfahren, auf denen auch die verkehrsabhängigen Ampelsteuerungen basieren, gegeben ist.

Fahrassistenzsystem

Es wird eine Software-Applikation mit GUI implementiert, die mit der zugekauften OnBoard-Unit Daten austauscht, eine Teilmenge der Daten dem Fahrer geeignet präsentiert, und lokale Verfahren umfasst, die aufgrund von empfangenen Statusdaten das optimale Annäherungsprofil bis zur LSA-Haltelinie für den Bus berechnet.

Cloud-basierte Datenbasis

Die von der straßenseitigen Infrastruktur und der Fahrzeugapplikation übertragenen Daten werden empfangen, auf Plausibilität untersucht, aggregiert bzw. verdichtet, zueinander in Beziehung gesetzt und abgespeichert. Die dazu notwendige Software wird im Projekt spezifiziert und implementiert.

Desktop-basierte Betriebsdatenauswertung

Es wird eine existierende Software-Applikation von MAT.TRAFFIC zur Auswertung von ÖPNV-bezogenen Betriebsdaten so modifiziert und erweitert, dass mit dieser Applikation auch die erweiterten Betriebsdaten (kontinuierliche Trajektorien statt einiger Meldepunkte) ausgewertet werden können. Auf diese Weise sollen die Ergebnisse der Auswertung akkurater, detaillierter und aussagekräftiger werden. Es wird ein PDF- Bericht mit der Auswertung erzeugt.

1.2. Voraussetzungen

In den Koalitionsverträgen der Bundesregierung und der Stadt Aachen wird die Stärkung des ÖPNV als unverzichtbares Element der Mobilitätswende herausgestellt. Ein wesentliches Element ist dabei die ÖPNV-Bevorrechtigung an signalisierten Knotenpunkten, um die Reisezeiten des ÖPNV zu verbessern, Verlustzeiten an Lichtsignalanlagen zu minimieren und den Umweltverbund durch eine Attraktivitätssteigerung des ÖPNV zu stärken.

Die Bevorrechtigung des ÖPNV an signalisierten Kreuzungen wurde in deutschen Städten bereits vor vielen Jahren eingeführt. Die bestehenden Anlagen arbeiten alle mit unidirektionalen Funkstrecken (R09). Auch wenn die Abschaltung des Analogfunks in Aachen nicht mittelbar droht, beabsichtigen Stadt Aachen und ASEAG, die Vorteile und die Möglichkeiten durch die C-ITS Technologien (802.11p und ETSI ITS G5) zu erproben. Ein wichtiger Aspekt hier ist eine migrationsfreundliche Einführungsstrategie, die es den Städten ermöglicht, die verkehrstechnische Infrastruktur schrittweise umzubauen. Insbesondere gibt es den folgenden Verbesserungs- / Optimierungsbedarf für die ÖPNV-Bevorrechtigung:

(1) Die verkehrsabhängigen Lichtsignalsteuerungen arbeiten heute mit fest vorgegebenen theoretischen Reisezeiten. Diese Einschränkung ist unflexibel und die davon abgeleitete Ankunftszeitprognose in der Regel zu ungenau, als dass die Steuerung das Grünfenster zeitlich exakt einstellen könnte.
(2) Der Fahrzeugführer fährt „blind“. Es gibt keine Online-Informationen im Bus bzgl. den ÖPNV betreffenden Freigabezeiten. Eine Interaktion zwischen Fahrzeugführer und LSA findet nicht statt.
(3) Es gibt eine immer höhere Anzahl von Baustellen in Aachen. Anzupassende Meldepunkte in den Steuerrechnern und in der ITCS-Versorgung benötigen einige Zeit Vorlauf und sind teils kostenintensiv bzw. nur durch den Anlagenhersteller BUS2DATA - mFUND Vorhabenbeschreibung 3 umsetzbar. Es gibt somit unweigerlich eine Vielzahl von „falschen“ Telegrammen und nicht genutztes Potential, um auf Umleitungsstrecken den ÖPNV ebenfalls möglichst zu bevorrechtigen.
(4) Qualitätsanalysen sind für die Bewertung und Überarbeitung der Steuerungen aus verkehrstechnischer Sicht in regelmäßigen Abständen erforderlich. Die verkehrstechnische Qualitätsanalyse der Lichtsignalsteuerungen basiert heute aber auf unvollständigen Betriebsdaten (Zeitstempel der Signalpunkte, nicht aber die genaue Annäherungsfahrt des Fahrzeugs), wodurch Aussagekraft und Zuverlässigkeit der Qualitätsanalyse eingeschränkt ist.

1.3. Planung & Ablauf

Für die Bearbeitung des Projektes werden insgesamt 15 Monate angesetzt. Der nachfolgende Zeitplan zeigt die zeitliche Abfolge der Arbeitspakete. Die Zeitachse ist relativ mit dem ersten Projektmonat bei Projektstart.

Aufgabe	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6	M 7	M 8	M 9	M 10	M 11	M 12	M 13	M 14	M 15
Projektmanagement, Verbreitung der Projektergebnisse															
Konzepte und Anwendungsfälle															
Definition der konkreten Anwendungsfälle															
Konzept für die ÖPNV-Bevorrechtigung auf der Basis von C2X Technologien															
Datenzentrierte Architektur mit Schwerpunkt Datenerhebungen und Datenbasen															
Konzept zur erweiterten Qualitätsanalyse für ÖPNV-Priorisierung an LSA															
Planung des Aachener Testfeldes															
Technik, Applikationen															
Integration der RSUs in den Steuergeräten des Testfeldes															
Mobile OnBoard-Unit mit 802.11P bzw. 4G für ASEAG Fahrzeuge															
Sammeln von Status- und Betriebsdaten in einer zentralen Datenbank															
Schnittstelle zu öffentlicher Datenplattform (**Erste Daten in der Mobilithek**)															
Integration Testfeld und Evaluation															
Einrichtung des Testfeldes															
Durchführung von Tests und Aufzeichnung von Betriebsdaten															
Auswertung der Tests															

ÖPNV QA mit erweiterter DB															
Qualitätsanalyse mit Hilfe der erweiterten Betriebsdaten															
Beurteilung der Qualitätsanalyse und Vergleich															
Übertragbarkeit und Skalierung															

1.4. Wissenschaftliche Ausgangslage

Das derzeit gängigste Verfahren zur Bevorrechtigung des ÖPNV an signalisierten Knoten ist die Verwendung von R09-Funktelegrammen. Zur Bestimmung des Sendezeitpunkts werden verschiedene Technologien eingesetzt, hauptsächlich werden Wegstreckenzähler und Funkbaken verwendet. Insbesondere Streckenzähler haben Genauigkeitsprobleme und sind nicht ohne weiteres an neue (ggf. temporäre) Kreuzungstopologien anpassbar. Außerdem bietet R09 standardmäßig keinen Rückkanal zum Fahrzeug. Zusätzlich zu den Unzulänglichkeiten laufen die Funkfrequenzen für die R09-Telegramme aus, so dass eine Ersatztechnologie gefunden werden muss. Erste Schritte in diese Richtung wurden bereits in anderen (Pilot-) Projekten unternommen. Zu nennen sind hier insbesondere (s. BAST V353, S.26ff):

- Düsseldorf: KoMoD
- Kassel: VERONIKA
- Braunschweig & Magdeburg: SIRENE
- Hamburg: BiDiMoVe
- Bielefeld, Gütersloh, Lemgo, Neuss, Rheine, Soest: KI4LSA Die aufgeführten Projekte sind hauptsächlich Machbarkeitsstudien für die ÖPNV-Bevorrechtigung mit der neuartigen C2X-Technologie. Es wird dort insbesondere gezeigt, wie ÖPNV-relevante Informationen in den C2X-Standardprotokollen verschlüsselt und transportiert werden (CAM, SPaT, SREM, SSEM). Auf diesem Kommunikations-Knowhow der anderen Projekte wird in diesem Projekt aufgesetzt.

Als Ersatz für die R09-Telegramme kann eine Kombination aus CAM und SREM-Nachrichten verwendet werden. Ein ähnliches System wurde bereits im Projekt C-ROADS unter dem Namen „Traffic Light Priorisation (TLP)“ entwickelt (siehe BAST V353, S. 36).

Die CAM-Meldungen ermöglichen eine zeitliche Lokalisierung des Fahrzeugs. Um die richtigen Telegramme senden zu können, muss das Fahrzeug seine Fahrtrichtung über den Knoten kennen oder von der Kreuzung mitgeteilt bekommen. Dies kann durch eine

Linienkonfiguration mit Unterstützung von MAPEM-Nachrichten (siehe BAST V353, S. 30 Tab. 2-1) realisiert werden, wobei MAPEM Informationen über die Kreuzungstopologie enthält und ebenfalls von der RSU gesendet wird.

Um im Fahrzeug Informationen über den Zustand der Kreuzung und der Lichtsignalanlage zu erhalten, können die Nachrichten SPaT (Signal Phase and Timing) und SSEM (Signal Status Message) verwendet werden (s. BAST V353, S. 30 Tab. 2-1). SPaT enthält allgemeine Informationen über den LSA-Status, während SSEM die Rückmeldung zu SSEM ist. Diese werden bereits von aktuellen RSU (Road Side Unit) gesendet und sollten von der OBU (On Board Unit) empfangen werden.

Die Informationen aus diesen Nachrichten können dann im Fahrzeug zur Interaktion mit dem Fahrer verwendet werden. Eine Interaktionsmöglichkeit ist die „Green Light Optimal Speed Advisory“ (GLOSA), die dem Fahrer die optimale Geschwindigkeit für eine (im Idealfall) stoppfreie Durchfahrt der Kreuzung vorgibt.

Im Vergleich zu den aufgeführten Projekten konnten folgenden Alleinstellungsmerkmale identifiziert werden:

- Das R09 Telegramm soll in die C-ITS Nachricht CAM eingebettet werden und wird von der RSU dem Ampelsteuergerät zur Verfügung gestellt. Dadurch können die bisherigen meldestreckenbasierten Ampelsteuerungen beibehalten werden, was einen wichtigen Migrationsschritt darstellt. Die Nutzung von SREM und SSEM soll in einem Nachfolgeprojekt geprobt werden.
- Betriebsdaten der ÖPNV-Beschleunigung (teilweise fahrzeuggeneriert) werden an zentraler Stelle gesammelt und verschiedenen Zwecken zugeführt: Stadtweites ÖV-Monitoring online, erweitertes Qualitätsmanagement, Publizierung auf öffentlichen Datenplattformen.
- ÖV-Fahrpersonal wird in den Ablauf der ÖPNV-Bevorrechtigung einbezogen, indem die sie betreffenden Ampelprognosen im Fahrzeug angezeigt werden, und über Interaktionen Einfluss auf die Ampelsteuerung genommen wird (Nachfolgeprojekt).
- Die Qualitätsanalyse der Ampelsteuerungen bzgl. ÖPNV-Bevorrechtigung wird signifikant verbessert indem erweiterte Betriebsdaten erzeugt werden, die es gestattet den Fahrweg der Fahrzeuge im Kreuzungsbereich sehr genau zu rekonstruieren.
- Die verkehrsabhängige Ampelsteuerung soll nicht mehr auf fixen, vordefinierten Meldestrecken und theoretischen Reisezeiten basieren, sondern vielmehr selbstorganisierend wichtige Steuerungsparameter im Betrieb anpassen (Vorarbeiten und Konzepte in diesem Projekt, vollumfängliche Realisierung im Nachfolgeprojekt). Dies soll auch die Flexibilität der Steuerung bei veränderlichen Verkehrsverhältnissen und temporärer Baustellen verbessern und den Planungsaufwand verringern

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

1.5.1 Projektpartner

Stadt Aachen

Der Fachbereich "Stadtentwicklung, -planung und Mobilitätsinfrastruktur" der Stadt Aachen arbeitet seit 1990 an der Förderung nachhaltigen Verkehrs. Seit 2009 ist Aachen "Modellstadt für Mobilitätsmanagement", seit 2010 auch "Modellregion" für Elektromobilität. Die prozess- und dialogorientierte Verkehrsentwicklungsplanung ist "dauerhaft" angelegt, die Rahmenbedingungen werden kontinuierlich für die städtische und regionale Mobilität geprüft.

ASEAG

Aachener Straßenbahn und Energieversorgungs-AG (ASEAG) Die ASEAG ist das von den Aufgabenträgern Stadt und Städteregion Aachen beauftragte Verkehrsunternehmen. Schwerpunkte sind unter anderem der Betrieb von Omnibussen zur Personenbeförderung und die Erprobung alternativer Antriebsformen und Mobilitätskonzepte. Darüber hinaus bringt sich die ASEAG in die Planungen rund um die „RegioTram“ (Wiedereinführung einer Stadtbahn) ein. Die ASEAG verfügt über langjährige Erfahrungen hinsichtlich der Lichtsignalbeeinflussung mittels Rechner gestütztem Betriebsleitsystem (RBL). Im Rahmen des Projektes liefert die ASEAG insbesondere Betriebsdaten und Erfahrungen hinsichtlich des Einsatzes von Elektrofahrzeugen. Insbesondere die Anforderungen hinsichtlich Darstellung, Option und Funktion der OBU sollen praxisorientiert „aus erster Hand“ festgelegt werden.

MAT.TRAFFIC GmbH

MAT.TRAFFIC ist ein Aachener Technologieunternehmen mit besonderer Expertise in den Bereichen Mobilität/Logistik, Verkehrsmodellierung und KI-Lösungen sowie Kommunikationstechnik. Schwerpunkte im Bereich Mobilität sind energieeffiziente Verkehrssteuerung, Modellierung von Straßenverkehrssystemen, Flottenmanagement und Qualitätsanalysen im ÖPNV. Darüber hinaus ist MAT.TRAFFIC Experte für Betriebsdaten von ÖPNV-Bevorrechtigungen und hat ein System zur Bewertung der Bevorrechtigungsqualität entwickelt. MAT.TRAFFIC übernimmt in diesem Projekt BUS2DATA - mFUND Vorhabenbeschreibung 10 die Erweiterung der vorhandenen Ampelsteuergeräte, die Nahbereichskommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur, die prototypische Ausstattung der ÖPNV-Fahrzeuge mit OnBoard-Applikationen und die prototyphafte Qualitätssicherung der ÖPNV-Bevorrechtigung auf der Basis erweiterter Betriebsdaten.

FEV Consulting

Die FEV Consulting hat im Rahmen des Projektes als Unterauftragnehmer eine Studie zur Übertragbarkeit der Projektergebnisse auf andere Städte durchgeführt „Ausroll-Guideline“. Die durchgeführte Untersuchung hat die Erkenntnisse der Projektarbeiten zusammenfassend bewertet und eingeordnet. Daneben hat die Studie Aufschlüsse darüber geben, inwieweit welche Anwendungsfelder („Use Case“) und Technologieaspekte in der Stadt Aachen bzw. in weiteren Städten und Kommunen durch die Projekterkenntnisse skaliert bzw. übertragen werden können.

1.5.2 Veranstaltungen

Das Projekt wurde in verschiedenen Kontexten präsentiert. Dazu zählt die verkehrstechnische Konferenz smartSummit Mönchengladbach, die mFund-Konferenz in Berlin sowie der Mobilitätsausschuss der Stadt Aachen.

2. Eingehende Darstellung

Das BUS2DATA Projekt umfasst drei wichtige Komponenten:

1. BUS2DATA Backend (Server)
2. Fahrassistenzsystem
3. Qualitätsanalyse

Deren Einbindung in das Gesamtsystem wird in Abbildung 1 gezeigt. Detaillierte Beschreibungen der einzelnen Komponenten sowie deren Aufgaben werden in den Folgekapiteln erläutert.

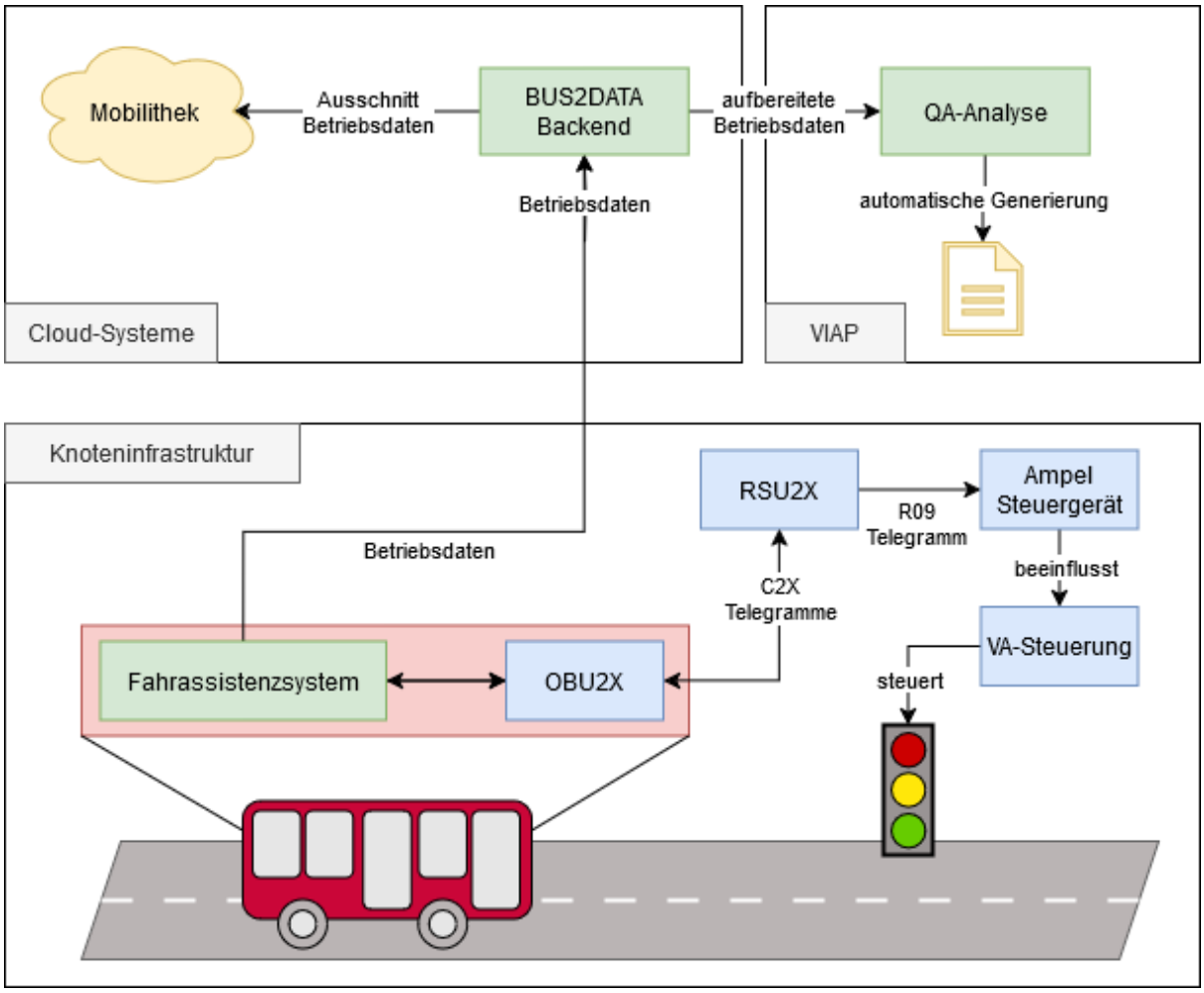


Abbildung BUS2DATA Gesamtübersicht

2.1. Verwendung der Zuwendung & erreichte Ziele

2.1.1 Straßenseitige Infrastruktur

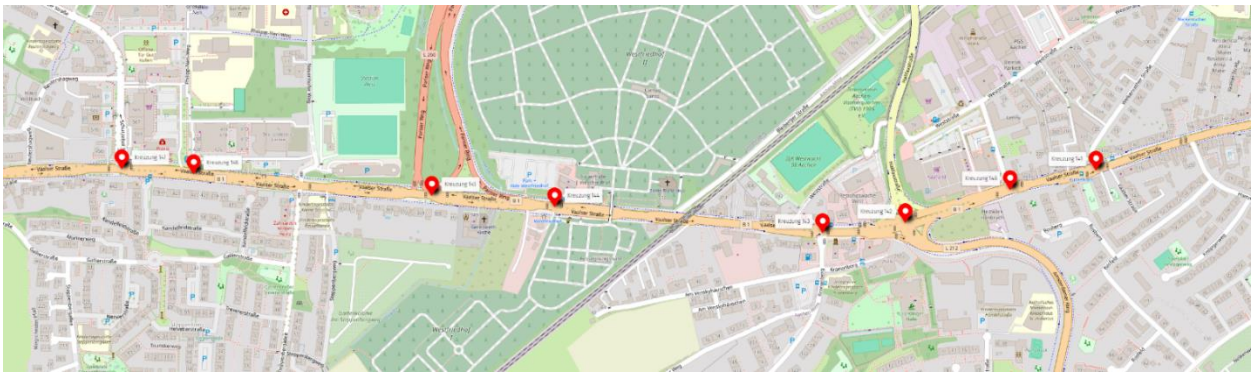
Umsetzung

Im Rahmen des Projekts wurde in der Stadt Aachen entlang der Vaalser Straße ein Testfeld eingerichtet, das aus acht aufeinanderfolgenden Kreuzungen besteht. Diese Kreuzungen wurden mit entsprechender Hard- und Software ausgestattet, um die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Verkehrsinfrastruktur zu ermöglichen.

Die Ausstattung umfasst zum einen die Road Side Units (RSUs), die das Versenden, Verarbeiten und Empfangen von C2X-Telegrammen ermöglichen. Zum anderen kommen SPaT-Boxen zum Einsatz, die Prognosen für die Grünzeiten bereitstellen. Zudem wurde ein

Treiber-Update des Steuergeräts implementiert, um die Kommunikation zwischen dem Steuergerät und den RSUs zu gewährleisten.

In den öffentlichen Verkehrsmitteln (ÖPNV) wurde eine On-Board Unit (OBU) installiert, die es den Fahrzeugen ermöglicht, Telegramme von den RSUs zu empfangen und mit eigenen Telegrammen zu antworten. Eine detaillierte Verortung der Kreuzungen sowie deren Bezeichnungen ist in Abbildung XX dargestellt. Besonders hervorzuheben ist die Kreuzung 145, die als einzige eine Bevorrechtigung für den ÖPNV unterstützt.



Ergebnis

Die praktische Umsetzung zeigt, dass die C2X-Kommunikation zwischen der OBU und den RSUs an allen Kreuzungen hinsichtlich des Austauschs von SPaT (Signal Phase and Timing), CAM (Cooperative Awareness Messages) und MAPEM (Map Exchange Messages) schnell und zuverlässig funktioniert, mit einer Reichweite von etwa 150 Metern. Eine Ausnahme bildet jedoch die Kreuzung 143, an der lediglich leere MAPEM- und SPaT-Nachrichten empfangen werden. Dieses Problem könnte durch eine nachträgliche Konfiguration der dortigen RSU behoben werden.

Zudem liefert die SPaT-Box an einigen Kreuzungen, insbesondere an solchen mit verkehrsabhängiger Steuerung, unzuverlässige Grünzeitprognosen, was sich als Herausforderung im Projekt herausstellte.

2.1.2 Fahrassistenzsystem

Umsetzung

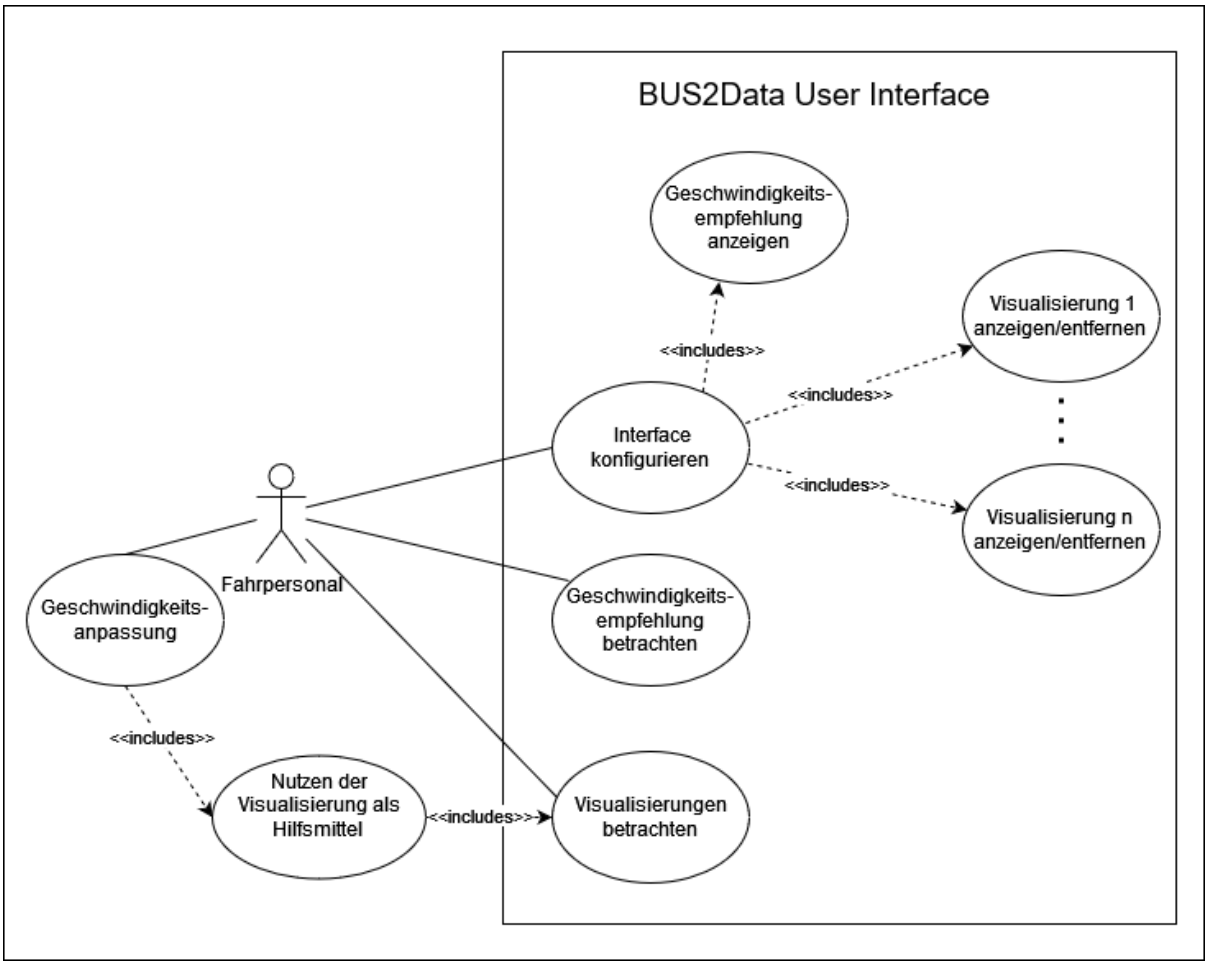
Die Implementierung des Fahrassistenzsystems, einschließlich der Cockpit-Anwendung zur Bereitstellung von Ampelschaltzeiten und Geschwindigkeitsprofilen für das Fahrpersonal, basiert auf einer klaren Trennung zwischen dem Cockpit-Service (Backend) und dem Cockpit-UI (Frontend). Diese Trennung ermöglicht eine durchgängige Kommunikation und Visualisierung in Echtzeit. Der Cockpit-Service ist verantwortlich für die Kommunikation mit der OBU sowie für die Datenaufbereitung. Die Verbindung zwischen Cockpit-Service und

OBU erfolgt über Bluetooth, wobei Daten wie SPAT-Nachrichten, GPS-Positionen der OBU, Fahrzeuggeschwindigkeiten, R09-Telegramme und CAMs über C2X ausgetauscht werden.

Auf Basis dieser Daten wird die aktuelle Distanz zur Haltelinie berechnet, und Fahrzeugtrajektorien werden konstruiert, die die genaue Anfahrt zur Kreuzung beschreiben. Eine Logik zur zuverlässigen Bestimmung der Überschreitung einer Haltelinie wurde ebenfalls implementiert. Alle relevanten Daten werden in Echtzeit an das Cockpit-UI und den BUS2DATA Cloud-Server als Datenstrom weitergeleitet, wobei eine bestehende Internetverbindung erforderlich ist. Die Bevorrechtigung wird vom Cockpit-Service realisiert, indem Informationen wie Meldepunktnummer, Knoteneingang und Knotenausgang, die lokal im Fahrassistenzsystem gespeichert sind, auf ein R09-Telegramm abgebildet und an die OBU gesendet werden. Diese bettet das Telegramm in eine CAM-Nachricht ein und sendet es an die RSU, die das R09-Telegramm dem Ampelsteuergerät zur Verfügung stellt. Dadurch können die bisherigen, in Aachen typischen meldestreckenbasierten Ampelsteuerungen beibehalten werden, was einen wichtigen Migrationsschritt darstellt.

Das Cockpit-UI visualisiert alle relevanten Informationen für das Fahrpersonal, einschließlich aktueller Ampelphasen und -zeiten, einer Geschwindigkeitsempfehlung (GLOSA) zur optimalen Überschreitung der Kreuzung, der aktuellen Distanz zur Haltelinie und einem visuellen Feedback zur erfolgreichen Bevorrechtigungsanfrage. Die Daten erhält das User Interface in Echtzeit über eine Websocket-Verbindung mit dem Cockpit-Service. Die grafische Oberfläche ist konfigurierbar, um je nach Einsatzzweck verschiedene Visualisierungen und Layoutvarianten zu ermöglichen.

Folgendes Use-Case Diagramm wurde dabei für das Cockpit-UI als Grundlage benutzt.



Momentan bietet die Cockpit-Anwendung folgende Visualisierungen:

1. Die Visualisierung in Abbildung 4 zeigt den Geschwindigkeitsbereich an, den das Fahrpersonal einhalten muss, um eine Grünphase zu erreichen. Der empfohlene Geschwindigkeitsbereich wird grün hinterlegt, wenn die aktuelle Geschwindigkeit des Fahrzeugs innerhalb dieses Bereichs liegt; andernfalls wird er rot angezeigt. Pfeile nach oben oder unten signalisieren, ob die Geschwindigkeit angepasst werden muss, um in den empfohlenen Geschwindigkeitsbereich zurückzukehren. Die Anzahl der Pfeile gibt an, wie stark die Geschwindigkeit erhöht oder verringert werden muss.

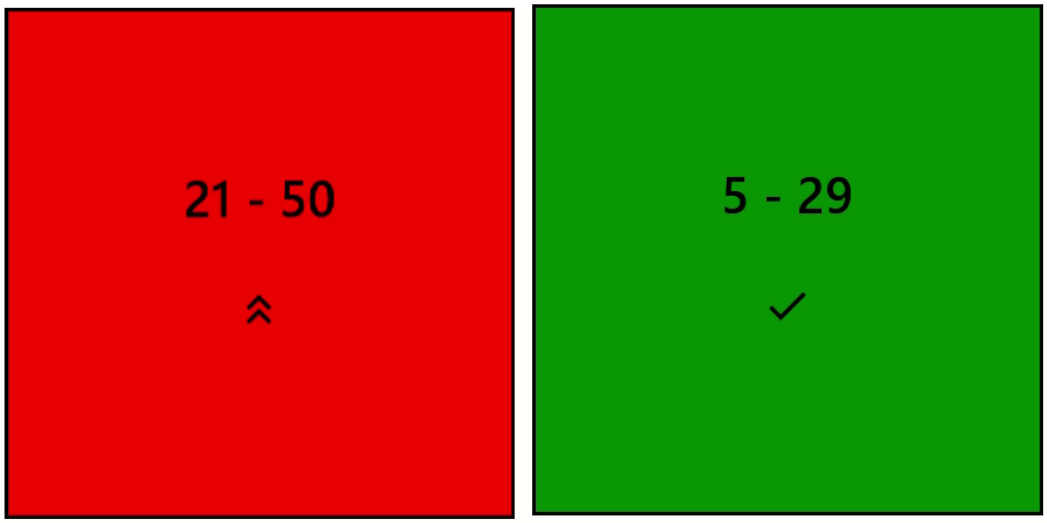


Abbildung 4 Geschwindigkeitsboxen

2. Abbildung 5 zeigt ein Tachometer, welches neben der aktuellen Geschwindigkeit auch die voraussichtliche Ampelphase bei Ankunft an der Haltelinie anzeigt, basierend auf der aktuellen Geschwindigkeit. Wenn das Fahrpersonal die Geschwindigkeit erhöht, rotiert die Ampelphasenanzeige gegen den Uhrzeigersinn; umgekehrt gilt dies für eine Geschwindigkeitsreduktion. Bei Geschwindigkeiten, für die die Ampelphasen unbekannt sind, wird die Anzeige grau dargestellt.

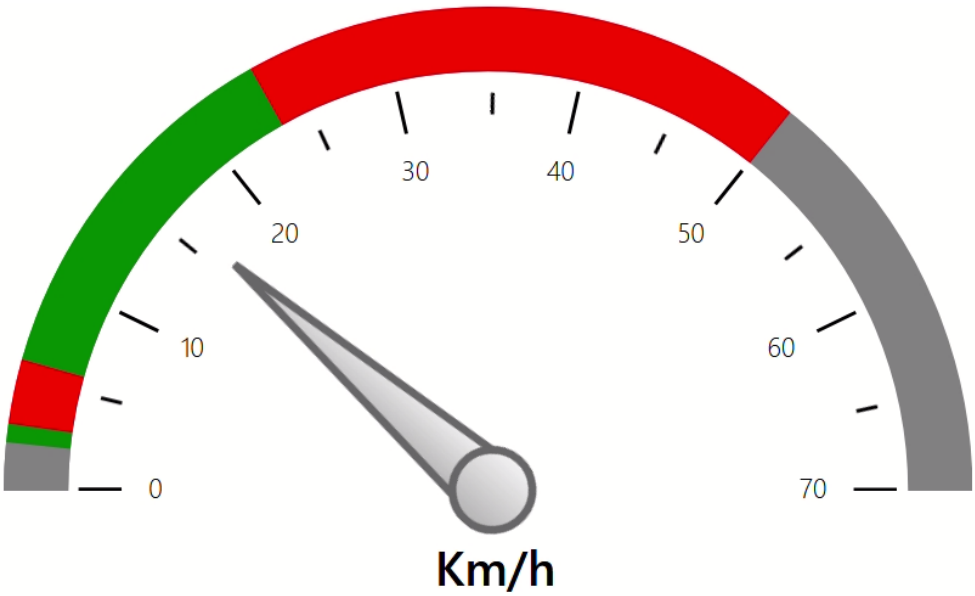


Abbildung 5 Tachometer mit Geschwindigkeitsempfehlung

3. Wenn von der OBU ein R09-Telegramm gesendet wird, wird dies im User Interface durch ein großes "HA" für eine Hauptanmeldung und "AB" für eine Abmeldung angezeigt, die kurz aufblitzen. In Abbildung 6 ist ein visuelles Feedback für eine Hauptanmeldung zu sehen.

Abbildung Visuelles Feedback für eine Hauptanmeldung

4. Die in Abbildung 7 präsentierte Visualisierung zeigt einen Timer, der die verbleibende Zeit der aktuellen Ampelphase anzeigt. Eine rot hinterlegte Zahl signalisiert eine Rotphase, während eine grün hinterlegte Zahl für eine Grünphase steht. Zusätzlich wird die aktuelle Distanz zur nächsten Haltelinie angezeigt.

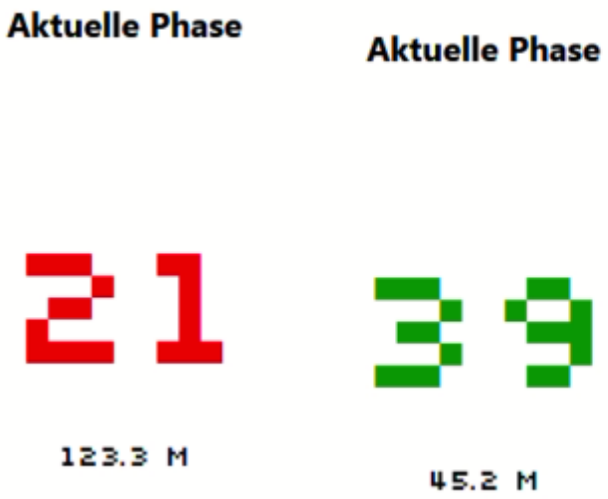


Abbildung 7 Beispiel für eine Restlaufzeit einer Grünphase (links) und einer Rotphase (rechts), inklusive Distanz zur Haltelinie

Ein Ausschnitt aus einem Beispiel-Cockpit ist in Abbildung 8 zu sehen.

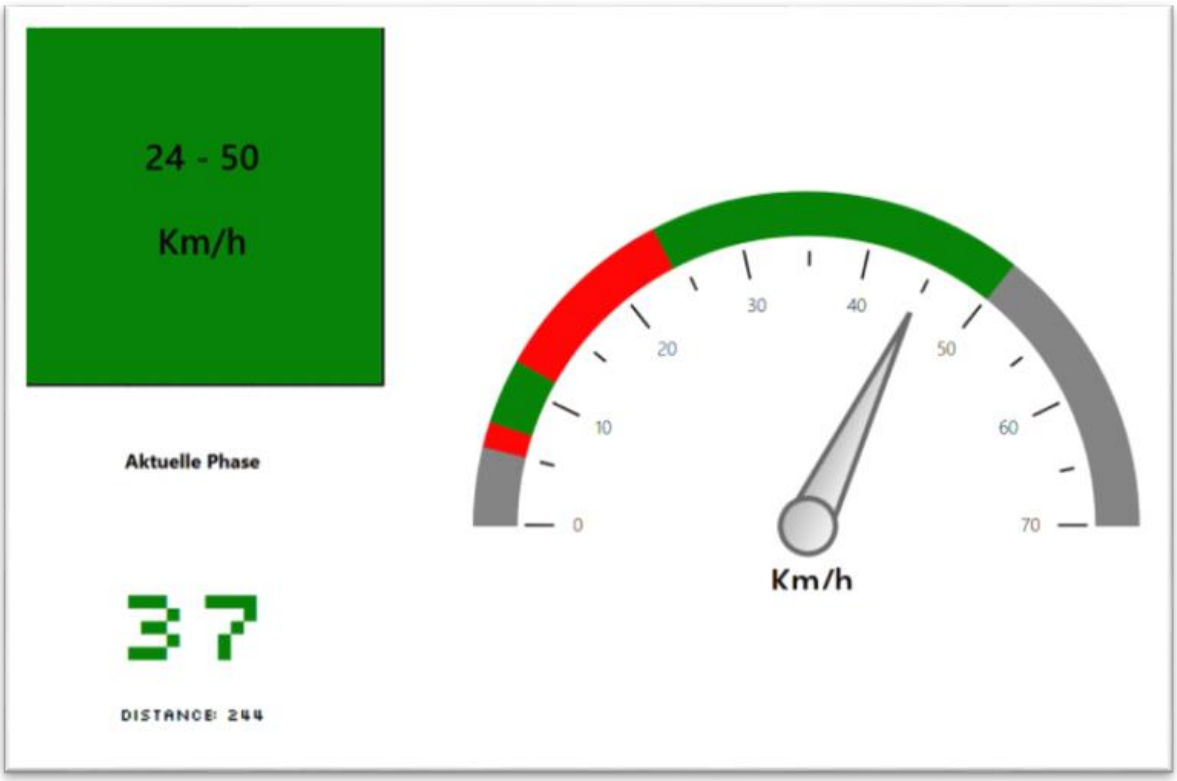


Abbildung 8 Beispiel Cockpit-Nutzeroberfläche

Herausforderungen

Zu den Herausforderungen, die im Rahmen des Fahrassistenzsystems auftraten, zählen unter anderem Verbindungsausfälle zur RSU, fehlende oder unvollständige Datenpakete sowie unzuverlässige Grünzeitprognosen der SPaT-Boxen an bestimmten Kreuzungen. Diese Probleme werden von der Anwendung adressiert, indem bei einem Verbindungsausfall oder unvollständigen Daten die zuletzt erhaltenen Informationen verwendet werden. Bei den Grünzeitprognosen werden kleine Schwankungen ignoriert, um die Benutzererfahrung nicht zu beeinträchtigen.

Ergebnis

Das Ergebnis ist ein konfigurierbares Cockpit-User-Interface, das dem Fahrpersonal in Echtzeit relevante Daten zur Verfügung stellt, die für die Navigation an bestimmten Kreuzungen wichtig sind. Optional kann das UI auch vollständig deaktiviert werden. In Testfahrten konnte durch die Geschwindigkeitsempfehlung häufig unnötiges Beschleunigen oder Bremsen vermieden werden, was zu einer Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs führt und somit die Umweltbelastung minimiert. Zudem könnte der

Fahrgastkomfort durch verringerte Fliehkräfte während der Fahrt gesteigert werden. Allerdings war dies an Kreuzungen mit verkehrsabhängiger Steuerung aufgrund der unzuverlässigen Grünzeitprognosen nicht immer möglich.

Die in den CAM-Nachrichten eingebetteten R09-Telegramme für die Bevorrechtigung konnten jedoch zuverlässig gesendet werden, was sich in den Betriebsdaten des Verkehrsrechners widerspiegelt. Durch den Austausch des Analogfunks mit einer bidirektionalen C2X-Kommunikation wurde zudem die Grundlage für die Nutzung von SSEM (Signal Phase Extension Message) und SREM (Signal Request Extension Message) im Kontext der Bevorrechtigung geschaffen.

2.1.3 Backend

Umsetzung

Das Backend ist ein auf Spring Boot basierender Webserver in der Cloud, der die vom Cockpit-Service gesendeten Datenströme hinsichtlich Ausreißer und Plausibilität überprüft, zueinander in Beziehung setzt und anschließend in einer relationalen Datenbank speichert. Diese Daten stehen über eine Schnittstelle der Qualitätsanalyse für die Analyse zur Verfügung. Darüber hinaus werden Daten im Rahmen des mFUND-Projekts in der Mobilithek frei zugänglich gemacht, einschließlich Live-Ampelphasen und -zeiten sowie vollständigen Fahrtverläufen von Fahrzeugen. Die Datenstruktur und das Format werden in den Abbildungen 9 und 10 dargestellt.

```xml
▼<rides>
  ▼<ride>
     <startTime>1732194507000</startTime>
     <startNode>148</startNode>
     <endNode>145</endNode>
     <obuSerialNumber>12345678</obuSerialNumber>
    ▼<positions>
      ▼<position>
         <timestamp>1732194582000</timestamp>
         <longitude>6.0616376</longitude>
         <latitute>50.7697211</latitute>
         <speed>31.77</speed>
         <distance>84.49717913907047</distance>
       </position>
      ▼<position>
         <timestamp>1732194583000</timestamp>
         <longitude>6.0615754</longitude>
         <latitute>50.7697024</latitute>
         <speed>34.2</speed>
         <distance>79.83702316463267</distance>
       </position>
      ▼<position>
         <timestamp>1732194584000</timestamp>
         <longitude>6.0614508</longitude>
         <latitute>50.7696732</latitute>
         <speed>34.2288</speed>
         <distance>70.69288978311475</distance>
       </position>
      ▼<position>
         <timestamp>1732194586000</timestamp>
         <longitude>6.0611677</longitude>
         <latitute>50.7696454</latitute>
         <speed>34.9992</speed>
         <distance>50.55115778832642</distance>
       </position>
       ...
     </positions>
   </ride>
 </rides>
```


Abbildung 9 Beispiel Fahrttrajektorie in XML

```xml
<realTimeSpat>
  <liveSpats>
    <intersectionId>145</intersectionId>
    <meldestreckeId>1</meldestreckeId>
    <moy>468793</moy>
    <spat>
      <state>2</state>
      <stateDescription>red</stateDescription>
      <minEndTime>8849</minEndTime>
      <maxEndTime>8889</maxEndTime>
      <likelyTime>8869</likelyTime>
      <likelyConfidence>14</likelyConfidence>
    </spat>
    <spat>
      <state>4</state>
      <stateDescription>green</stateDescription>
      <minEndTime>9189</minEndTime>
      <maxEndTime>9239</maxEndTime>
      <likelyTime>9209</likelyTime>
      <likelyConfidence>14</likelyConfidence>
    </spat>
    <spat>
      <state>2</state>
      <stateDescription>red</stateDescription>
      <minEndTime>9749</minEndTime>
      <maxEndTime>9799</maxEndTime>
      <likelyTime>9769</likelyTime>
      <likelyConfidence>15</likelyConfidence>
    </spat>
    <spat>
      <state>4</state>
      <stateDescription>green</stateDescription>
      <minEndTime>10089</minEndTime>
      <maxEndTime>10139</maxEndTime>
      <likelyTime>10109</likelyTime>
      <likelyConfidence>15</likelyConfidence>
    </spat>
  </liveSpats>
  <liveSpats>
    <intersectionId>148</intersectionId>
    <meldestreckeId>1</meldestreckeId>
    <moy>468789</moy>
    <spat>
      <state>4</state>
      <stateDescription>green</stateDescription>
      <minEndTime>5939</minEndTime>
      <maxEndTime>5959</maxEndTime>
      <likelyTime>5949</likelyTime>
      <likelyConfidence>5</likelyConfidence>
    </spat>
    ...
  </liveSpats>
</realTimeSpat>
```


Abbildung 10 Beispiel Live Ampelphasen in XML

Ergebnis

Der Cloud-Server konnte in Testfahrten mit einem Fahrzeug und somit einer Cockpit-Anwendung alle von der Cockpit-Anwendung gesendeten Datenströme zuverlässig verarbeiten und speichern. Während der Tests wurde der Datenstrom erhöht, um den Einsatz mehrerer Cockpit-Anwendungen zu simulieren. Dabei zeigte sich, dass der Cloud-Server bei der Verarbeitung und Persistierung der Daten bei hohem Datenaufkommen nicht mithalten konnte, was zu einem Stau des Datenstromes führte.

Im Falle einer Ausweitung des Projekts auf mehrere Fahrzeuge könnte die Nutzung von Kafka eine mögliche Lösung darstellen, da Kafka hohe Datenströme effizient verarbeitet und persistiert und Drittsystemen (in diesem Fall der Qualitätsanalyse und der Mobilithek) als Broker die Daten zur Verfügung stellt. Das Publizieren der Daten in die Mobilithek sorgt für Transparenz und bietet Datennehmern zusätzliche Informationen für neue Geschäftsmodelle und Lösungen.

2.1.4 Qualitätsanalyse

Umsetzung

Die Qualitätsanalyse bot vor dem BUS2DATA-Projekt eine umfassende Analyse auf Basis der Betriebsdaten aus dem Verkehrsrechner, die Schaltzeiten sowie An- und Abmeldezeiten umfasste. Diese An- und Abmeldezeiten konnten zu sogenannten Meldungsketten zusammengefasst werden, aus denen die zugehörige Fahrttrajektorie in Kombination mit den Schaltzeiten an den Kreuzungen abgeleitet werden konnte. Die Rekonstruktion dieser Fahrttrajektorien basierte jedoch auf vielen Annahmen, was die Aussagekraft und Zuverlässigkeit der Qualitätsanalyse einschränkten. Der genaue Zeitpunkt der Überschreitung der Haltelinie, die Wartezeit an der Haltelinie sowie die Geschwindigkeit an verschiedenen Positionen konnten somit nur geschätzt werden.

Im Rahmen des BUS2DATA-Projekts wurde die Qualitätsanalyse nun erweitert, indem die gesammelten Daten des BUS2DATA-Backends, wie genaue Fahrttrajektorien an Kreuzungen und Ampelschaltzeiten, zusätzlich genutzt werden. Darüber hinaus wurden Ideen wie eine Heatmap zur Visualisierung der mittleren Geschwindigkeiten an einer Kreuzung sowie eine Karte, die die gesamten Fahrtverläufe an einer Kreuzung anzeigt, umgesetzt.

Im Folgenden werden einige Ausschnitte aus der Qualitätsanalyse auf Basis der genauen Fahrttrajektorien, die während Testfahrten aufgezeichnet wurden, gezeigt.

Reisezeiten der Testfahrten

5.4.2 Reisezeiten

Die nachfolgende Tabelle enthält Statistiken der Reisezeiten der Busse für verschiedene Tageszeiten (Mittelwerte und Standardabweichungen (SD)) im Vergleich mit der vorgegebenen theoretischen Reisezeit. Dabei handelt es sich im die Reisezeit bis zur Passierung der Haltlinie um die Vergleichbarkeit mit der theoretischen Reisezeit zu gewährleisten.
Das Delta theoretische Reisezeit berechnet sich durch das Abziehen der theoretischen Reisezeit von der mittleren Reisezeit. Dadurch bedeuten positive Deltas Reisezeiten die größer als die theoretische Reisezeit sind und umgekehrt.

Tagesstunde	Anzahl Fahrten	Mittlere Reisezeit	Unteres Quantil	Oberes Quantil	Delta theoretische Reisezeit	Min	Max
11:00-12:00	5	19.7	8.5	41.5	−12.3	8.5	41.5
12:00-13:00	1	8.6	8.6	8.6	−23.4	8.6	8.6
14:00-15:00	3	17.4	17.4	17.4	−14.6	17.4	17.4
15:00-16:00	5	45.0	41.6	47.6	13.0	41.6	47.6

Tabelle 5.8: Reisezeit (theoretische Reisezeit = 32.0 s)

Abbildung 11 Mittlere Reisezeiten der Testfahrten

Heatmap über die mittlere Geschwindigkeit

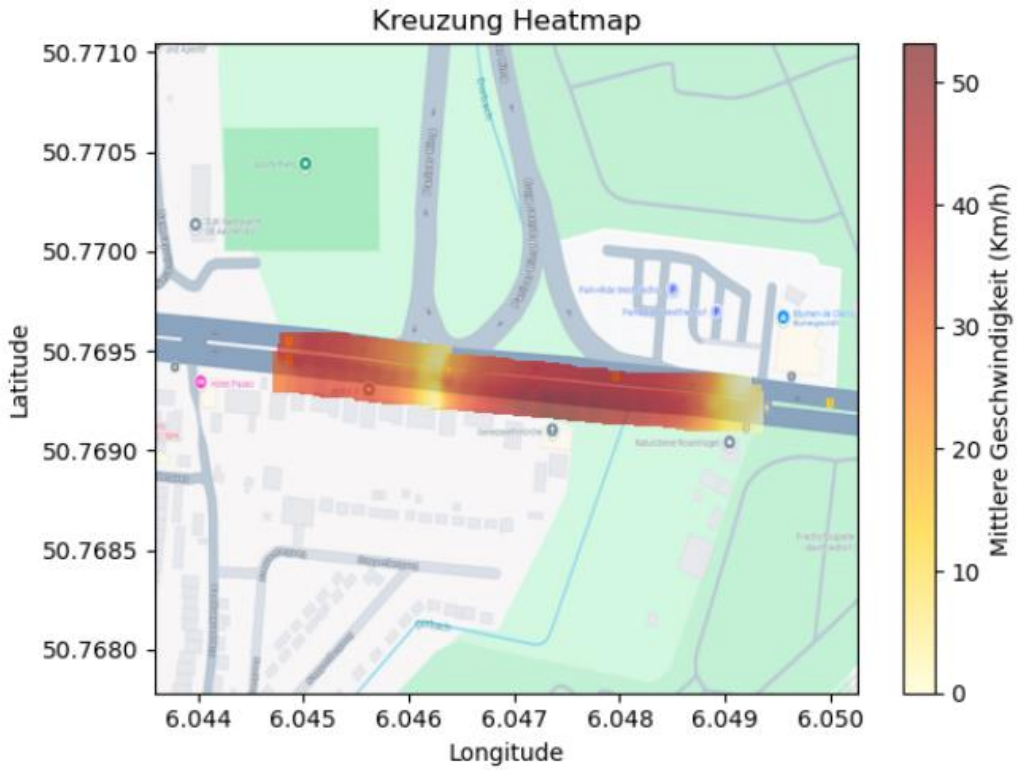


Abbildung 5.1: Heatmap

Abbildung 12 Kreuzung 145 Heatmap über die mittleren Geschwindigkeiten

Fahrttypen

Abbildung 5.5: Fahrttypen

Abbildung 13 Fahrttypen der Testfahrten

Wartezeiten

5.4.5 Wartezeiten

Die nachfolgende Tabelle enthält Statistiken der Wartezeiten der Busse für verschiedene Tageszeiten (Mittelwerte und Standardabweichungen (SD)), die von den Fahrttrajektorien abgeleitet wurden.

Tagesstunde	Anzahl Fahrten	Mittlere Wartezeit	Unteres Quantil	Oberes Quantil	Min	Max	Mittlere Wartezeit ohne VA	Delta Wartezeit ohne VA
11:00-12:00	5	8.8	0.0	29.0	0.0	29.0	18.1	9.3
12:00-13:00	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14:00-15:00	3	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	0.0
15:00-16:00	5	32.6	30.0	35.0	30.0	35.0	32.6	0.0

Tabelle 5.10: Wartezeit

Abbildung 14 Mittlere Wartezeiten während den Testfahrten an der Kreuzung

Wartezeitreduzierung durch Bevorrechtigung

5.4.8 Wartezeitreduzierung durch Bevorrechtigung

Eine Statistik über die Wartezeitreduzierung, die alle die Busse erfahren, die die Erweiterung der Freigabezeit nutzen. Dabei sind „VA-Fahrten“ die Fahrten, die die Erweiterung des Freigabefensters nutzen. „Anteil VA-Fahrten“ ist der der Anteil dieser Fahrten an allen aufgezeichneten Fahrten durch die gegebene Freigabe.

SP	TX	Fahrten	Wartezeitreduzierung pro Fahrt [s]
SP3	74	14	3.3

Tabelle 5.13: Wartezeitreduzierung pro Fahrt

SP	TX	VA-Fahrten	Anteil VA-Fahrten	Mittlere Reduzierung [s]	Minimale Reduzierung [s]	Maximale Reduzierung [s]
SP3	74	1	7.1%	46.5	46.5	46.5

Tabelle 5.14: Wartezeitreduzierungen

Abbildung 15 Durchschnittliche Wartereduzierung pro Fahrt und Wartezeitreduzierungen durch Erweiterung der Freigabe

Freigabezeitsekunden der Testdurchfahrten

5.4.10 Freigabezeitsekunden der Durchfahrt

Die Verteilung der Zeitpunkte innerhalb der Freigabezeit, zu dem die Busse die Haltelinie überfuhren (abgeleitet von den rekonstruierten Fahrttrajektorien). Die Sekunde 0 auf der X-Achse ist der Freigabebeginn im Signalplan / Rahmenplan. Diese Zeit wird mit einer senkrechten blauen Linie im Histogramm markiert. Die gelbe Linie markiert das Freigabeende im Signalplan / Rahmenplan.

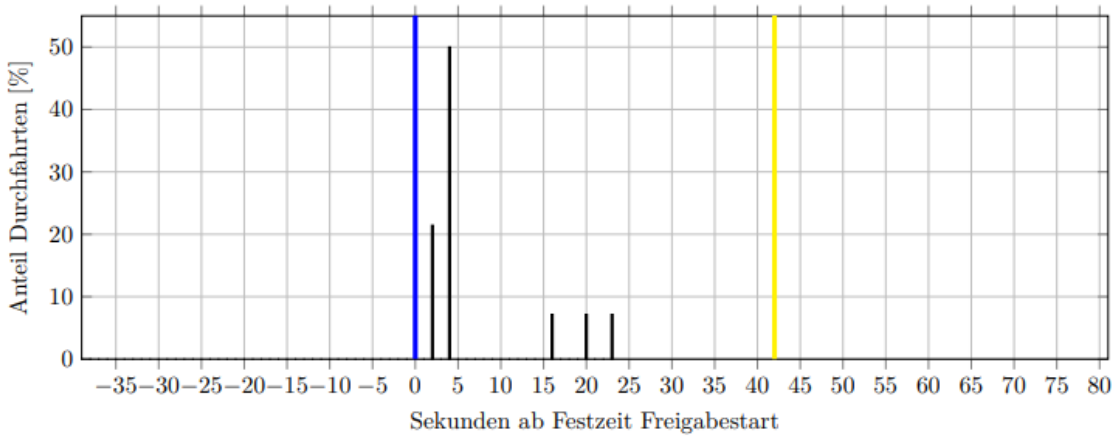


Abbildung 5.10: Verteilung 13/14 Freigabedurchfahrten SP3 mit Festzeit Freigabestart TX=74

Abbildung 16 Freigabezeitsekunden der Durchfahrten

Fahrttrajektorien der Testfahrten

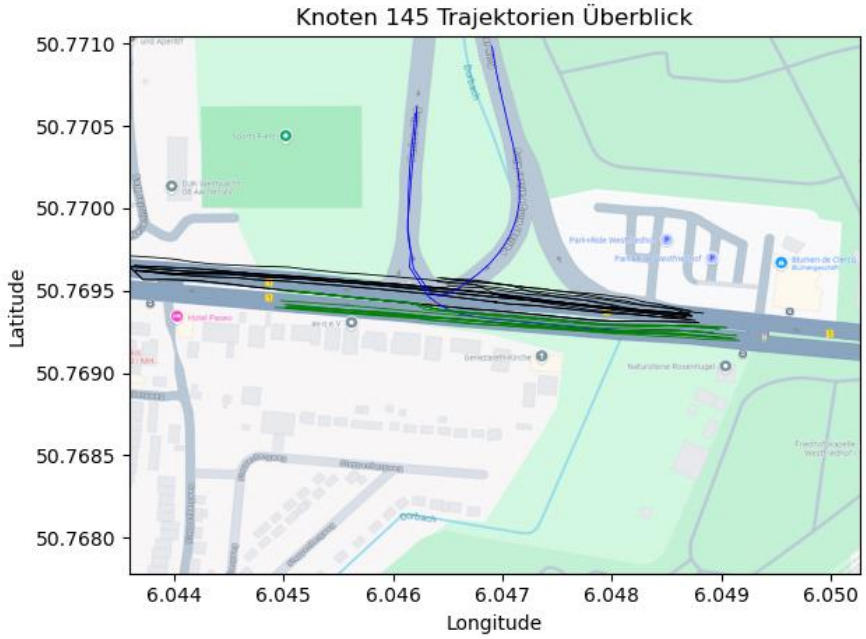


Abbildung 17 Alle aufgezeichneten Fahrttrajektorien bei den Testfahrten an Kreuzung 145

Ergebnis

Das Ergebnis dieser erweiterten Qualitätsanalyse ist eine genauere, detailliertere und aussagekräftigere Analyse, die zusätzlich auf den aufgezeichneten Fahrttrajektorien und Ampelschaltzeiten basiert. Die zusätzliche Unabhängigkeit von den Betriebsdaten aus dem Verkehrsrechner ermöglicht eine schnellere Generierung der Qualitätsanalyse, da die Betriebsdaten nicht mehr vor Ort importiert werden müssen. Zudem ist die Qualitätsanalyse nun leichter auf andere Städte übertragbar.

Es ist jedoch zu beachten, dass die Nutzung der Schaltzeiten aus dem BUS2DATA-Backend mit Vorsicht erfolgen sollte, da diese auf den Prognosen der SPaT-Boxen basieren, die teilweise ungenaue Prognosen liefern.

2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

- Stadt Aachen:
  - Abstimmung von Konzepten, die die städtische, verkehrstechnische Infrastruktur betreffen
  - Testfeldorganisation
  - Bereitstellung der Knoteninfrastruktur (RSU und Anbindung an den Verkehrsrechner)
- MAT.TRAFFIC:
  - Konzepte und Software-Entwicklung
  - Technische Testfeldeinrichtung
  - Evaluation der Tests
  - Erweiterte Evaluation von Betriebsdaten
- ASEAG:
  - Abstimmung von Konzepten, die die ÖV-Fahrzeuge betreffen
  - Fahrzeuginfrastruktur (OBU)
  - Personalakzeptanz

2.3. Notwendigkeit & Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Ein Hauptgrund für den Test der neuen Kommunikationstechnologie über V2X ist die anstehende Abschaltung von Analogfrequenzen. Darunter fallen die Frequenzen einiger Verkehrsbetriebe, die zum Versand der R09-Telegramme genutzt wurden. Im Projekt wurde ein System entwickelt, welches zunächst die grundlegende Nutzung von V2X für die Bevorrechtigung testet und anschließend weitere Möglichkeiten evaluiert, die die V2X-Technologie bietet.

2.4. Nutzen & Verwertbarkeit

Das entwickelte System kann Städte bei der Umstellung auf eine ÖPNV-Bevorrechtigung unterstützen, indem es einen neuen Kommunikationskanal für R09-Telegramme erschließt. Außerdem erlaubt es neue Möglichkeiten, die durch Verwendung von V2X entstehen zu erschließen.

2.5. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit wurde an anderen Stellen Forschung und Projekte mit ähnlichen Aspekten betrieben.

LOGIN Hannover

Im Rahmen des LOGIN Projektes wurde ein Leitfaden entwickelt, der Städte bei der Einrichtung einer C-ITS basierten ÖPNV-Bevorrechtigung unterstützen kann. Hier wird hauptsächlich auf die Bevorrechtigungsmöglichkeiten von C-ITS Systemen eingegangen. Der Hauptunterschied zu BUS2DATA ist die Nutzung von SREM- und SSEM-Telegrammen für die Bevorrechtigungsanforderung.

Graz

Die Stadt Graz hat Mitte 2024 mit dem Ausrollen der C-ITS Technologie auf die gesamte Fahrzeugflotte begonnen. Das zeigt, wie zukunftsträchtig die Technologie ist, und wie wichtig Projekte wie BUS2DATA sind, um das volle Potential dieser Technologie zu ergründen.

https://www.kleinezeitung.at/steiermark/graz/18680309/intelligentes-verkehrssystem-soll-grazer-oeffis-sicherer-und-machen

Hamburg

In Hamburg wurde ein paar Monate nach Projektende ebenfalls ein Pilot zur Nutzung der V2X Technologie in der Hochbahn beendet. Auch hier zeigen die Ergebnisse das große Potential der Technologie, aber auch, dass die Möglichkeiten noch nicht vollständig ausgeschöpft sind.

https://www.trapezegroup.de/news/text/erfolgreicher-pilotbetrieb-v2x-bei-der-hamburger-hochbahn/

2.6. Veröffentlichung der Ergebnisse

Hauptergebnis des Projektes ist, dass existierende ÖPNV-Bevorrechtigungen auf Analogfunkbasis mit minimalem technischem Aufwand durch eine ÖPNV-Bevorrechtigung

auf V2X-Basis ersetzt werden kann. Notwendig ist dazu lediglich ein Ausbau der knoten- und fahrzeugseitigen Infrastruktur (RSUs & OBUs).

Die Ergebnisse des Projektes wurden innerhalb des Konsortiums geteilt und bei Gelegenheit mit interessierten externen Parteien geteilt. Zudem ist ein Folgeprojekt mit einem Fokus auf den Produktivbetrieb geplant, in dessen Rahmen die Ergebnisse weiter verbessert und für andere Parteien einfacher nutzbar gemacht werden. Außerdem wurde das Projekt beim smartCity Summit in Mönchengladbach, sowie im Mobilitätsausschuss der Stadt Aachen vorgestellt. Die jetzigen Ergebnisse des aktuellen Projektes wurden im Rahmen der Übertragbarkeitsstudie der FEV für weitere Parteien nutzbar gemacht werden.