

# Cloudbasierte V2X-Kommunikation zur dynamischen Zielführung im vernetzten Verkehr

Sören Scherler<sup>1\*</sup>, Lars Rüdiger Kelm<sup>2</sup>, Sven Jacobitz<sup>1</sup>, Florian Pramme<sup>2</sup>, Gert Bikker<sup>2</sup>, Xiaobo Liu-Henke<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Fakultät Maschinenbau, Institut für Mechatronik, Salzdahlumer Str. 46/48, 38302 Wolfenbüttel, Deutschland; \*so.scherler@ostfalia.de

<sup>2</sup>Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Fakultät Informatik, Institut für Verteilte Systeme, Am Exer 2, 38302 Wolfenbüttel, Deutschland

**Abstract.** In diesem Beitrag werden Entwurf und Verifikation einer Netzwerkinfrastruktur zur cloudbasierten V2X-Kommunikation und dynamischen Zielführung im vernetzten Verkehr dargestellt. Mithilfe der entworfenen Infrastruktur wird die beschränkte Reichweite der WLAN-basierten V2X-Kommunikation nach IEEE 802.11p erhöht, sodass dynamische Informationen über Störungen des Verkehrsflusses in einem weiten Umkreis vorliegen. Eine Schnittstelle auf Fahrzeugebene zur Integration dieser Informationen in das Kartenmaterial ermöglicht eine dynamische Zielführung, welche frühzeitig optimale Alternativrouten berechnet.

## Einleitung

### Motivation

Im Teilprojekt *Intelligente Elektrofahrzeuge mit Range Extender in Verkehrssystemen mit Fahrzeug 4.0 (iREX 4.0)* des vom Nds. Ministeriums für Wissenschaft und Kultur sowie der VolkswagenStiftung geförderten Verbundprojekts *Zukünftige Fahrzeugtechnologien im Open Region Lab (ZuFOR)* werden automatisierte Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzellen-Range-Extender untersucht. Das iREX 4.0 zielt auf den zeit- und energieoptimierten, prädiktiven Fahrbetrieb im vernetzten Verkehr [1].

Um dieses Ziel zu erreichen, werden Optimierungspotentiale in der Zielführung („Optimale Route zur Erfüllung der Fahraufgabe“), der Bahnplanung („Optimale Fahrzeugführung auf der gewählten Route zur Erfüllung der Fahraufgabe“) und dem Energiemanagement („Optimale Verteilung der zur Erfüllung der Fahraufgabe notwendigen Leistung auf Batterie und Brennstoffzelle“) fokussiert. Im vorliegenden Beitrag wird mit der Zielführung das erste Optimierungspotential adressiert.

### Problem- und Zielstellung

Die dynamische Zielführung berücksichtigt zum Finden optimaler Routen neben statischen Karten zunehmend dynamische Echtzeit-Verkehrsinformationen, die über etablierte Kanäle wie dem Traffic Message Channel (TMC) oder dem Nachfolgeprotokoll der Transport Protocol Experts Group (TPEG) bereitgestellt werden. Zusätzlich bietet die WLAN-basierte V2X-Kommunikation nach IEEE 802.11p in ad-hoc-Netzwerken weitere Informationen zur Verbesserung der Zielführung.

Die Problemstellung liegt in der auf einige 100 m beschränkten Reichweite der WLAN-basierten V2X-Kommunikation, sodass relevante Informationen erst kurzfristig und zu spät für eine vorausschauende Alternativroutenplanung berücksichtigt werden können. Die Zielstellung der in diesem Beitrag dargestellten Forschungstätigkeiten liegt in der Reichweitenerhöhung der V2X-Kommunikation durch Entwicklung einer Netzwerk- und Cloudinfrastruktur und deren Integration in die dynamische Zielführung eines Fahrzeugs.

### Struktur des Beitrags

Als Grundlage dieses Beitrags wird in Abschnitt 1 ein Überblick über den Stand des Wissens zu vernetzten Verkehrssystemen, zu Technologien der V2X-Kommunikation sowie zur dynamischen Zielführung dargestellt. Die eingesetzte ganzheitliche, mechatronische Entwicklungs- und Absicherungsmethodik wird in Abschnitt 2 vorgestellt. In Abschnitt 3 erfolgt die Konzeption einer Netzwerkinfrastruktur zur cloudbasierten V2X-Kommunikation und dynamischen Zielführung. Der Entwurf der Netzwerk- und Cloudinfrastruktur wird in Abschnitt 4 und die Erweiterung der dynamischen Zielführung um die cloudbasierte V2X-Kommunikation in Abschnitt 5 dargestellt. Abschnitt 6 beschreibt die Verifikation und

Validierung anhand einer Pilotanwendung und Abschnitt 7 ein Resümee sowie einen Ausblick.

## 1 Stand des Wissens

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über den Stand des Wissens dargestellt.

### 1.1 Vernetzte Verkehrssysteme

Vernetzte Verkehrssysteme basieren auf den u.a. in der EU-Richtlinie 2010/40/EU definierten Intelligent Transportation Systems (ITS). Sie beinhalten Fahrzeuge, Infrastrukturelemente bzw. Road Side Units (RSUs) und weitere (nichtmotorisierte) Verkehrsteilnehmer, welche drahtlos miteinander vernetzt sind und Telemetriedaten austauschen. Diese können zur Verbesserung des eigenen Betriebs und auch für kooperative Funktionen (z.B. für Kreuzungsmanagementsysteme, vgl. [2]) verwendet werden [3]. Die drei wesentlichen Ziele eines ITS sind nach [4] die Steigerung von Verkehrseffizienz, Sicherheit und Energieeffizienz. Essenzielle Grundlage zur Zielerfüllung ist die Vernetzung mittels drahtloser V2X-Kommunikation, die durch die im folgenden Abschnitt 1.2 vorgestellten Technologien realisiert werden kann.

### 1.2 Technologien zur V2X-Kommunikation

Die Realisierung der V2X-Kommunikation erfolgt entweder mit der Dedicated Short Range Communication (DSRC), einer WLAN-basierten Kommunikation nach IEEE 802.11p in flexiblen ad-hoc-Netzwerken, oder mit der Cellular-V2X-Communication (C-V2X), einer auf LTE oder 5G basierenden Mobilfunktechnologie.

Die DSRC benötigt im Gegensatz zu C-V2X keine eigene Infrastruktur, wodurch die Leistungsfähigkeit unabhängig von Netzabdeckung und -auslastung ist [5], keine Investitionskosten anfallen und keine Abhängigkeit vom flächendeckenden Ausbau des 5G-Netzes besteht. Nach [6] beträgt die maximale, effektive Reichweite der DSRC unter Sichtkontakt ca. 1 km und unter Nicht-Sichtkontakt, wie sie im urbanen Umfeld i.d.R. vorliegen, ca. 300 m. C-V2X hingegen verfügt nach [7] durch Nutzung des Mobilfunknetzes über eine unbegrenzte Reichweite und auch eine höhere Bandbreite bei Kommunikation über mehr als 300 m, sodass mehr Daten über eine größere Distanz ausgetauscht werden können.

Für die V2X-Kommunikation, insb. für die DSRC, existiert eine Vielzahl genormter Nachrichtentypen [8]. Das European Telecommunications Standards Institute

(ETSI) spezifiziert für den europäischen Raum bspw. die periodisch versendete Cooperative Awareness Message (CAM, [9]) und die ereignisbasiert versendete Decentralised Environmental Notification Message (DENM, [10]). CAM beinhalten Informationen über Fahrzeugart und aktuelle Fahrzeugzustände (z.B. Geschwindigkeit, Position), um z.B. Kollisionen zu vermeiden. DENM enthalten Informationen über Ereignisse, welche Verkehrssicherheit oder -zustand beeinträchtigen.

Potentiale zur Reichweitenerhöhung liegen im Multi-Access-Edge-Computing (MEC), welches Netzwerkstrukturen mit zwischen einer zentralen Cloud sowie mehreren Netzwerkknoten (Edges, im Kontext dieses Beitrags RSUs) aufgeteilter Rechenleistung vorsieht [11]. Vorteilhaft ist einerseits, dass die Verarbeitung von V2X-Nachrichten dezentral und lokal in der RSU erfolgen kann, und andererseits, dass die Netzwerkanbindung der RSUs an die Cloud eine Verteilung der V2X-Nachrichten über große Distanzen ermöglicht. [12] stellt vielfältige Anwendungsfälle des MEC für die V2X-Kommunikation dar.

### 1.3 Dynamische Zielführung

Algorithmen zur Zielführung suchen in gerichteten und gewichteten Graphen, welche ein Straßennetzwerk mathematisch beschreiben, einen zeit-, distanz- oder energieoptimalen Pfad zwischen einem Start- und einem Zielknoten. In vielen Anwendungen werden der Dijkstra-Algorithmus [13] oder eine der zahlreichen Weiterentwicklungen zur Effizienzsteigerung (vgl. [14]) eingesetzt. Aktuelle Forschungstätigkeiten betrachten zudem stochastische Verfahren wie die von [15] vorgestellte Ant Colony Optimization oder die von [16] dargestellten Ansätze der Künstlichen Intelligenz mit maschinellem Lernen.

Die Güte der besten Route hängt bei allen Ansätzen von der Aktualität und Vollständigkeit des zugrundeliegenden Kartenmaterials ab. Der Informationsgehalt einer Karte wird anhand des in Abbildung 1 dargestellten Modells der Local Dynamic Map (LDM) in vier Schichten in Abhängigkeit ihrer Dynamik klassifiziert.

Die beiden unteren Schichten (Type 1/2) beinhalten statische Informationen, die i.W. das Straßennetz und die Verkehrsinfrastruktur beschreiben.

Die Type3-Schicht, Grundlage der dynamischen Zielführung, enthält transient-dynamische Informationen über den Straßenzustand (Glätte, Nässe, etc.), Schaltphasen von Lichtsignalanlagen sowie das Verkehrs- und Unfallgeschehen. Diese Informationen werden durch die

etablierten Technologien des TMC und seines Nachfolgeprotokolls TPEG bereitgestellt. Der TMC basiert auf analogem Rundfunk und weist eine geringe Datenrate von ca. 10 Meldungen pro Minute auf. Zudem kann für eine Meldung nur bestimmt werden, zwischen welchen zwei Anschlussstellen von Autobahnen oder Bundesstraßen sie liegt. Per TPEG werden Meldungen digital per Internet, Mobilfunk oder drahtlosen Netzwerken verteilt. Mit digitalem Radio (DAB) lassen sich bspw. mehr als 3000 Meldungen pro Minute mit eindeutig definierter Position in WGS84-Koordination versenden. [17]

Die vierte Ebene (Type 4) enthält hochdynamische Informationen mit einem Horizont weniger Sekunden wie Fahrzeuggeschwindigkeiten und -positionen oder Fahrzeugzustände (z.B. Notbremsung oder ABS-Eingriff). Diese Informationen werden per V2X-Kommunikation von anderen Fahrzeugen oder der Infrastruktur in einem lokal begrenzten Umkreis bereitgestellt oder durch die eigene Umfeldsensorik ermittelt.

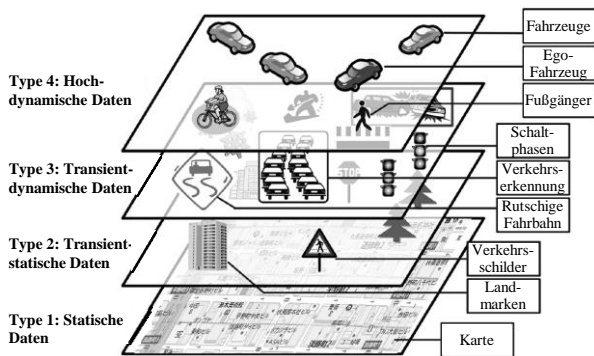


Abbildung 1: Schichtenmodell einer LDM nach [18].

## 1.4 Fazit

Die Vernetzung in Verkehrssystemen bietet neue Informationsquellen, welche zur Optimierung des Fahrbetriebs verwendet werden können. Die V2X-Kommunikation scheint eine sinnvolle Ergänzung der LDM auf Type3-Schicht zur Optimierung der dynamischen Zielführung zu sein. Dies gilt insbesondere für kurzfristig aufgetretene Ereignisse, welche noch nicht durch TMC oder TPEG erfasst wurden. Aufgrund des in Deutschland aktuell noch laufenden Ausbaus des 5G-Netzwerks und der nicht flächendeckenden Verfügbarkeit wird die DSRC als Kommunikationstechnologie in diesem Beitrag zugrunde gelegt. Problem für die dynamische Zielführung ist die begrenzte Reichweite der DSRC, allerdings werden MEC-Ansätze als aussichtsreich zur signifikanten Reichweitenerhöhung betrachtet.

## 2 Methodik

### 2.1 Mechatronische Entwicklungsmethodik

Die durchgängig modellbasierte und verifikationsorientierte Funktionsauslegung und -absicherung vernetzter mechatronischer Systeme (vgl. Abbildung 2) nach [19] hat sich in zahlreichen Anwendungen in Forschung und Industrie als zeit- und kosteneffizient erwiesen.

Ausgehend von Anforderungen und Lastenheft erfolgt die Model-in-the-Loop-Simulation (MiL), in der Funktionen ohne Anspruch auf Echtzeitfähigkeit entwickelt und an einem Systemmodell erprobt werden. Aus den simulativ erprobten Funktionen wird im Rahmen der Software-in-the-Loop-Simulation (SiL) mittels automatischer Code-Generierung ein ausführbarer Target-Code erzeugt, welcher wiederum mit einem Systemmodell auf Funktion und Fehler getestet wird. Daraufhin erfolgt die Hardware-in-the-Loop-Simulation (HiL), bei welcher ein um physische Teilkomponenten ergänztes, echtzeitfähiges Systemmodell zur Funktionsabsicherung und -optimierung verwendet wird. Begleitet wird dieses Vorgehen durch stetige Messungen an realen Systemen, um fortlaufende Verifikationen und Validierungen der Modelle und der ausgelegten Regelalgorithmen durchzuführen.

Mithilfe dieser Methodik wird eine durchgängige Entwicklung basierend auf virtuellen Prototypen bis zum fertigen Produkt sichergestellt. Dieser Beitrag stellt aus der Methodik schwerpunktmäßig die Verifikation und Validierung der cloudbasierten V2X-Kommunikation zur dynamischen Zielführung unter Echtzeitbedingungen mittels HiL-Simulation dar (vgl. Abschnitt 6).

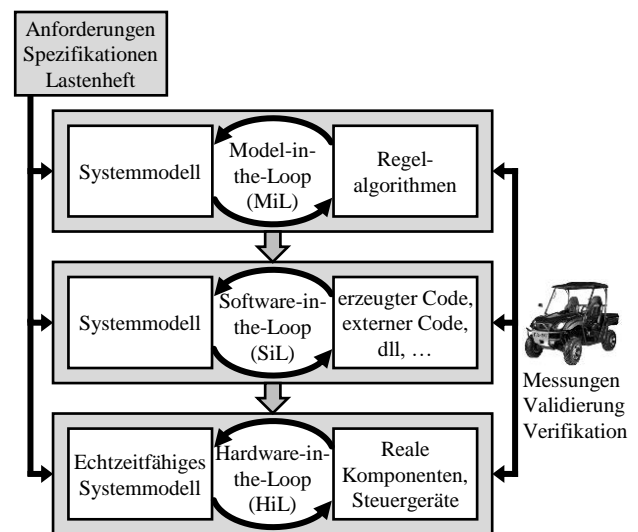


Abbildung 2: Durchgängig modellbasierte, verifikationsorientierte Entwicklungsmethodik nach [19].

## 2.2 Relevante Prüfinfrastruktur

Zur Durchführung von HiL-Simulationen unter Echtzeitbedingungen werden ein mobiler HiL-Prüfstand (Simulation des Ego-Fahrzeugs) sowie eine waveBEE®plus der Fa. Nordsys (Verkehrssimulation) verwendet.

Der mobile HiL-Prüfstand (vgl. Abbildung 3) verfügt über ein Echtzeitsystem der Fa. dSPACE (MicroLabBox - MLBX), auf dem Echtzeitanwendungen (z.B. die dynamische Zielführung) ausgeführt werden. Die MLBX ermöglicht zudem die Anbindung externer IO sowie verschiedener Bussysteme. Weiterhin verfügt er über eine V2X-Einheit zur DSRC mittels WLAN (IEEE 802.11p), in der eine integrierte GPS-Antenne zur Positionsbestimmung enthalten ist. Ein Nachrichtenkonverter bildet die Schnittstelle zum Echtzeitsystem. Er kodiert die von der Echtzeitanwendung generierten V2X-Nachrichten für den Versand und dekodiert die empfangenen Nachrichten, sodass Ego-Position und V2X-Daten durch die Echtzeitanwendung genutzt werden können.

Die Echtzeitanwendung wird in Matlab/Simulink auf dem Prüfstands-PC programmiert und im Anschluss mittels automatisierter Codegenerierung auf die MLBX übertragen. Der Prüfstands-PC dient zudem als Human-Machine-Interface (HMI), durch welches der Nutzer den V2X-Prüfstand überwachen und steuern kann.

Die waveBEE®plus ist ein V2X-Umfeldgenerator für DSRC-Nachrichten. Dieses wird zum Test von auf DSRC basierenden Funktionen genutzt, indem virtuelle Verkehrsszenarien definiert und reale V2X-Nachrichten der virtuellen Verkehrsteilnehmer versendet werden.

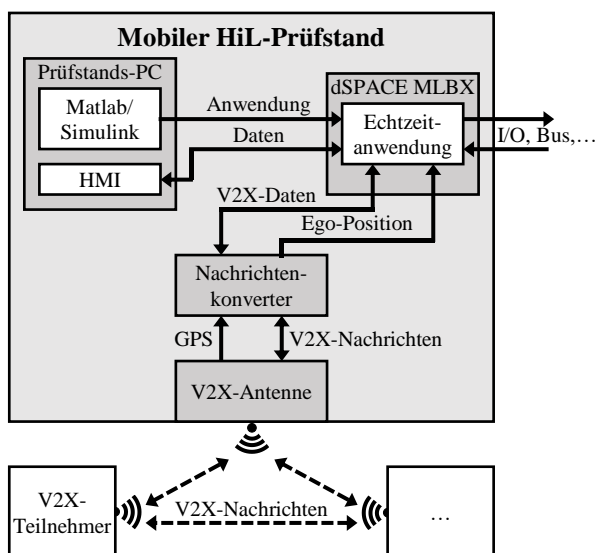


Abbildung 3: Struktur des mobilen HiL-Prüfstands zur Zielführung und V2X-Kommunikation [20].

## 3 Konzeption der Netzwerk- und Cloudinfrastruktur

Dieser Abschnitt stellt die Konzeption der Netzwerk- und Cloudinfrastruktur dar.

### 3.1 Definition des Anwendungsbereichs

Als Anwendungsbereich werden urbane Umgebungen betrachtet, da diese deutlich komplexere Gegebenheiten aber auch weitreichendere Optimierungspotentiale in der Zielführung verglichen mit außerstädtischen Bereichen (Land- und Bundesstraßen, Autobahnen) aufweisen:

- Geringere Reichweite der DSRC aufgrund dichter Bebauung, dichten Verkehrs und weiterer Störeinflüsse durch Funknetzwerke und andere Strahlungsquellen.
- Dichteres Straßennetz mit mehr Freiheitsgraden beim Auffinden einer Route und dem Planen von Alternativrouten bei Störungen (z. B. Baustellen, Unfälle).
- Häufigere Störungen durch höheres Verkehrsaufkommen und erhöhte Unfallwahrscheinlichkeit. Nach [21] fanden 2019 in Deutschland ca. 64 % aller Unfälle mit Personenschäden in geschlossenen Ortschaften statt.
- Höhere Anzahl von Kreuzungen, die durch RSUs aufgerüstet und so in ein ITS integriert werden können.

Eine Übertragung der dargestellten Forschungstätigkeit auf außerstädtische Bereiche ist prinzipiell möglich, wird in diesem Beitrag allerdings nicht weiter betrachtet.

### 3.2 Ableiten von Anforderungen

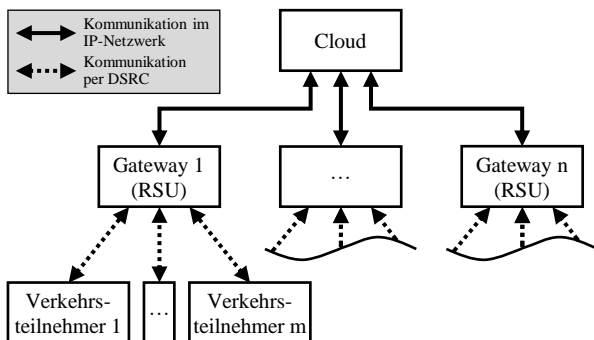
Basierend auf der Analyse des Standes des Wissens (Abschnitt 1) und dem geplanten Anwendungsbereich (Abschnitt 3.1) werden folgende Anforderungen an die Netzwerkinfrastruktur zur cloudbasierten V2X-Kommunikation und dynamischen Zielführung gestellt:

- Ermöglichen der Kommunikation zwischen zwei Verkehrsteilnehmern, auch wenn die Distanz für die direkte DSRC zu hoch ist.
- Datenverarbeitung mit maximaler Latenz von 5 ms, um die Kommunikation und Nutzung der Daten in Echtzeit zu ermöglichen.
- Unterstützung von DSRC-Nachrichten nach ETSI-Standards (z.B. CAM und DENM).
- Konvertieren von DSRC-Nachrichten, sodass diese in die dritte Schicht einer LDM integriert und für die dynamische Zielführung genutzt werden können.
- Möglichkeit zur Anbindung von Systemen, die nicht explizit für die V2X-Kommunikation vorgesehen

sind. Ein Beispiel stellen Echtzeit-Verkehrssimulationen auf HiL-Prüfständen dar, die für den Funktionstest eines Verkehrsteilnehmers genutzt werden könnten.

### 3.3 Netzwerkinfrastruktur zur cloudbasierten V2X-Kommunikation

Aus den Anforderungen wird die in Abbildung 4 dargestellte Netzwerkinfrastruktur zur cloudbasierten V2X-Kommunikation abgeleitet, welche dem Prinzip des MEC entspricht. Grundlage bilden Verkehrsteilnehmer, die per DSRC mit einer RSU kommunizieren. Die RSU stellt ein Gateway bzw. einen Edge dar und konvertiert die erhaltenen V2X-Nachrichten, um sie per IP-Netzwerkverbindung (IEEE 802.3) an eine zentrale Cloud zu senden. Diese verarbeitet und speichert die erhaltenen Nachrichten und verteilt sie an die anderen Gateways im Netzwerk, welche die Nachrichten per DSRC wiederum an die in Reichweite befindlichen Verkehrsteilnehmer verteilen. Aufgrund der hohen Reichweite und Erweiterbarkeit der IP-Netzwerkverbindung wird die Reichweite der DSRC signifikant gesteigert, sodass diese auch zur dynamischen Zielführung genutzt werden kann.



**Abbildung 4:** Netzwerkinfrastruktur zur cloudbasierten V2X-Kommunikation und dynamischen Zielführung basierend auf dem Prinzip des MEC.

## 4 Entwurf der Netzwerk- und Cloudinfrastruktur

Der Entwurf der Netzwerk- und Cloudinfrastruktur umfasst die zentrale Cloud (Abschnitt 4.1) sowie die Gateways zwischen Cloud und Verkehrsteilnehmern (Abschnitt 4.2).

### 4.1 Zentrale Cloud

Die zentrale Cloud ist eine modulare Software, die als transparenter Broker für heterogene Nachrichten von verschiedenen Endpunkten bzw. Gateways auftritt. Mithilfe

der Cloud sollen Daten aus verschiedenen Quellen mit ggf. unterschiedlichem Format und Inhalt zentralisiert erfasst, gespeichert und verteilt werden. Für eine flexible Erweiterbarkeit und die Unabhängigkeit von den Quellen arbeitet die Cloud mit einer einheitlichen Zwischendarstellungsschicht der Nachrichten (Intermediate Representation – IR), sodass unterschiedliche Formate und Inhalte nicht von Relevanz sind. Die Überführung von Nachrichten in die IR und umgekehrt erfolgt durch die Gateways (vgl. Abschnitt 4.2).

Die Cloud verfügt über einen Broker und eine Datenbank. Der Broker koordiniert die Kommunikation zwischen allen Gateways. Er verteilt eingehende IR-Nachrichten nach dem Publish-Subscribe-Verfahren zur Speicherung an die Datenbank und andere Gateways. Nach Bedarf können Nachrichten aus der Datenbank angefragt und erneut verteilt werden.

Der modulare Aufbau der Cloud ermöglicht die Erweiterung um zusätzliche Module bspw. zur Verarbeitung großer Datenmengen oder zur Durchführung komplexer Berechnungen.

### 4.2 Gateway zwischen Verkehrsteilnehmern und zentraler Cloud

In Abbildung 5 ist schematisch die Schichtenarchitektur eines Gateways bzw. einer RSU, angelehnt an [22] und [23], dargestellt. Ziel ist die Konvertierung von V2X-Nachrichten in IR-Nachrichten und umgekehrt. Neben Funktionen für Netzwerkmanagement und -sicherheit verfügt diese Architektur über vier wesentliche Layer.

Auf dem Access Layer (OSI-Schichten 1 und 2) liegt die WLAN-Kommunikation nach IEEE 802.11p zu den Verkehrsteilnehmern (Austausch von V2X-Nachrichten) und die IP-Netzwerkverbindung nach IEEE 802.3 zur zentralen Cloud (Austausch von IR-Nachrichten). Auf dem Netzwerk & Transport Layer (OSI-Schichten 3 und 4) erfolgt die Konvertierung der Daten abhängig vom gewählten Kommunikationsprotokoll. Bei diesen handelt es sich um das Basic Transportation Protocol (BTP) für V2X-Nachrichten und UDP (oder auch TCP) für IR-Nachrichten. Auf dem Facility Layer (OSI-Schichten 5 und 6) erfolgt die Verarbeitung der Nachrichten in Abhängigkeit ihres Typs. So werden CAM bspw. durch den CA Service und DENM durch den DEN Service verarbeitet. Auf dem Application Layer (OSI-Schicht 7) liegt die Converter Application, welche eine Transformation zwischen V2X- und IR-Nachricht durchführt und somit die Schnittstelle zwischen den beiden

Kommunikationswegen bildet. Die Converter Application ist spezifisch auf den Endpunkt der Kommunikation angepasst und kann beliebige Informationen, bspw. aus Verkehrssimulationen, in die IR überführen.

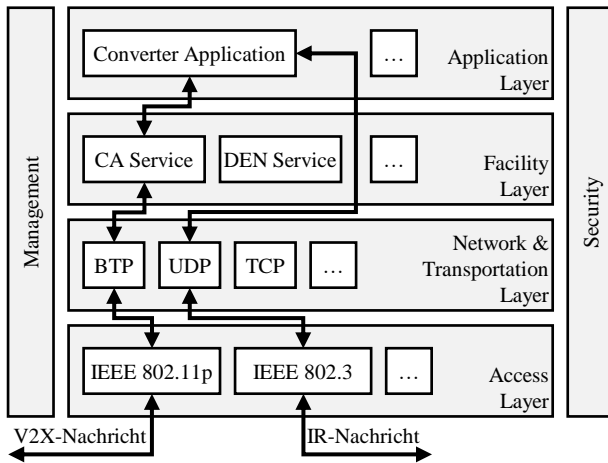


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Schichtenarchitektur eines Gateways.

## 5 Erweiterung der dyn. Zielführung um die cloudbasierte V2X-Kommunikation

Dieser Abschnitt stellt die grundlegende Funktionsstruktur der dynamischen Zielführung und die Integration der V2X-Nachrichten in das Kartenmaterial der LDM dar.

In Abbildung 6 ist die Funktionsstruktur der dynamischen Zielführung dargestellt. Kern der Zielführung ist das, u. a. um Höhendaten der NASA Shuttle Radar Topography Mission ergänzte [24], statische Kartenmaterial der OpenStreetMap [25]. Die Informationen aus der Ermittlung von Fahrzeugzuständen, der Umfeldperzeption und der V2X-Kommunikation werden genutzt, um das statische Kartenmaterial der LDM zu aktualisieren und es um dynamische Informationen auf den Type3/4-Schichten zu erweitern. Des Weiteren werden GPS-Daten aus der Zustandserfassung sowie die Umfeldperzeption mit SLAM-Verfahren zur Selbstlokalisierung genutzt, um den Startpunkt der Zielführung zu bestimmen. Basierend auf der dynamischen Karte, der Ego-Position und dem Fahrtziel wird durch die Zielführung eine bzgl. Fahrdauer, Distanz oder Energieverbrauch optimierte Route ermittelt. Die Zielführung basiert auf dem Dijkstra-Algorithmus ergänzt um eine Heuristik zur Reduktion des Rechenaufwandes. Weiterführende Informationen zur dynamischen Zielführung sind in [26] dargestellt.

Die Kartenaktualisierung erfolgt durch temporäre Anpassung der zu den V2X-Nachrichten gehörenden Kantenbewertungen im Graphen auf der Type3-Schicht der LDM. Zunächst wird aus der GPS-Position der V2X-Nachricht ermittelt, welcher Kante die Information zuzuweisen ist. Anschließend erfolgt die Änderung der Kantengewichte je nach Art der Information. Tritt bspw. eine vollständige Straßensperrung infolge eines Unfalls auf, werden für die entsprechende Kante sowohl Distanz als auch Dauer und Energieverbrauch auf unendlich gesetzt, sodass die Kante nicht mehr Bestandteil der optimalen Route sein kann. Tritt hingegen eine Verzögerung durch stockenden Verkehr an einer Baustelle auf, werden nur Dauer und Energieverbrauch der Kante geändert, da sich die Streckenlänge nicht ändert.

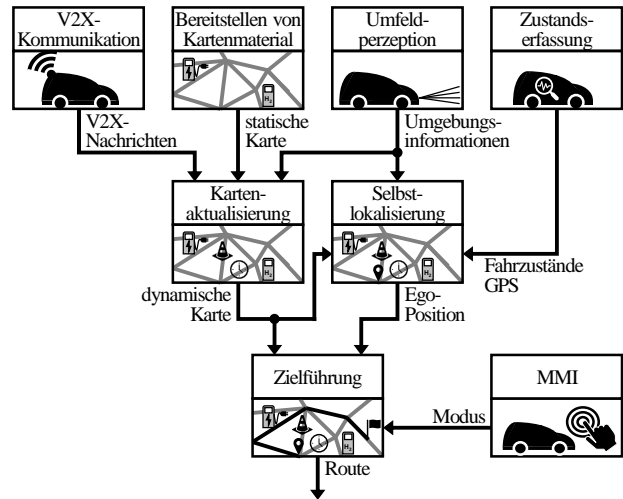


Abbildung 6: Funktionsstruktur der dyn. Zielführung.

## 6 Verifikation und Validierung

Zur Verifikation und Validierung wird zunächst eine Pilotanwendung definiert (Abschnitt 6.1). Daraufhin erfolgt die Auswertung der in dieser Pilotanwendung durchgeführten Echtzeitsimulationen (Abschnitt 6.2).

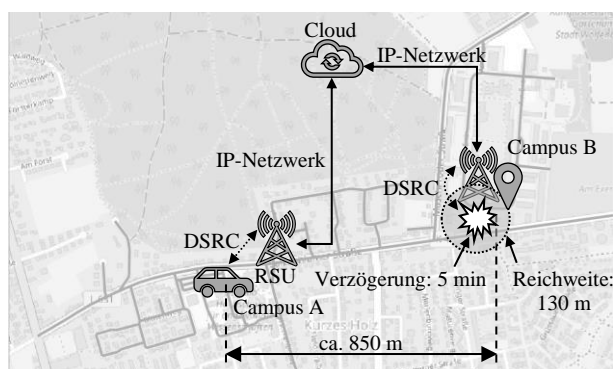
### 6.1 Definition der Pilotanwendung

Die zur Verifikation und Validierung betrachtete Pilotanwendung im urbanen Umfeld der Ostfalia Hochschule in Wolfenbüttel ist in Abbildung 7 dargestellt.

Zur HiL-Simulation unter Echtzeitbedingungen werden verschiedene Systeme verwendet, welche informationstechnisch miteinander gekoppelt sind. Die dynamische Zielführung des Ego-Fahrzeugs (vgl. Abschnitt 5) zur Ermittlung der optimalen Route wird auf dem mobilen HiL-Prüfstand (vgl. Abschnitt 2) ausgeführt. Mittels

DSRC kommuniziert der mobile HiL-Prüfstand mit einer RSU, welche an ein IP-Netzwerk angebunden ist. Über diese Netzwerkverbindung kommuniziert die RSU mit der Cloud, welche wiederum auf einem zentralen Server ausgeführt wird. An die Cloud ist per Netzwerkverbindung zudem der V2X-Umfeldgenerator waveBEE@plus (vgl. Abschnitt 2) angebunden, welcher in der definierten Pilotanwendung die V2X-Nachrichten aller Verkehrsteilnehmer mit Ausnahme des Ego-Fahrzeugs bereitstellt. Diese werden mithilfe der Cloudinfrastruktur an das Ego-Fahrzeug weitergeleitet.

In der Pilotanwendung soll ein V2X-fähiges Fahrzeug von Campus A zu Campus B fahren. Auf der kürzesten Route befindet sich eine Verzögerung von 5 min durch eine kurzfristig eingerichtete Baustelle. In der HiL-Simulation werden zwei exemplarische Szenarien betrachtet: Im ersten Szenario (Referenz) ist die zuvor beschriebene Infrastruktur nicht vorhanden, sodass lediglich die normale DSRC genutzt werden kann. Die effektive Reichweite von ca. 130 m, welche im Umfeld der Ostfalia mit dem mobilen HiL-Prüfstand ermittelt wurde, ist nicht ausreichend für eine frühzeitige Neuberechnung der Route. Im zweiten Szenario ist zusätzlich die cloudbasierte V2X-Kommunikation verfügbar.



**Abbildung 7:** Urbane Pilotanwendung an der Ostfalia in Wolfenbüttel mit Infrastruktur zur cloudbasierten V2X-Kommunikation [27].

## 6.2 Ergebnisse der Echtzeitsimulationen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Echtzeitsimulationen dargestellt. Diese umfassen die Latenzen der Verarbeitung durch die Cloudinfrastruktur und die Ergebnisse der dynamischen Zielführung.

Die Latenz wird zwischen dem Zeitpunkt des Nachrichteneingangs in der Cloud bis zur abgeschlossenen Datenverarbeitung in der Cloud anhand von Zeitstempeln gemessen. Es werden zwei Szenarien mit unter-

schiedlicher Systemauslastung betrachtet. Im ersten Szenario ist das Linux-System, auf dem die Cloud ausgeführt wird, normal ausgelastet. Im zweiten Szenario wird mit weiteren Threads eine maximale Systemauslastung hervorgerufen, um die Latenz bei dieser zu untersuchen. Tabelle 1 beinhaltet die Ergebnisse der Latenzanalyse. Unter normaler Systemauslastung werden durchschnittliche und maximale Latenzzeiten erzielt, welche deutlich unterhalb des Grenzwerts von 5 ms liegen und eine hinreichend schnelle Verarbeitung garantieren. Unter erhöhter Systemlast wird ein deutliches Überschreiten des Grenzwertes in über 80 % der Fälle festgestellt. Hieraus folgt, dass unter dieser Systemlast unzulässig hohe Verzögerungen bei der Datenverarbeitung auftreten können. Es ist allerdings anzumerken, dass die (künstlich hervorgerufene) erhöhte Systemlast in der finalen Anwendung auf einem eigens für die Cloud vorgesehenen Rechner durch entsprechende Sicherheits- und Priorisierungsmaßnahmen vermieden wird.

Weiterhin wurde messtechnisch erfasst, dass die Latenz der Nachrichtenübertragung von einer RSU zu einer anderen mittels IP-Netzwerkkommunikation über die Cloud (inkl. Verarbeitungszeit der Cloud) durchschnittlich unterhalb von 2 ms liegt. Verglichen mit den gemessenen Latenzen der DSRC (160 bis 250 ms) sind diese vernachlässigbar.

	Normale Systemlast	Erhöhte Systemlast
$t_{\max}$ in ms	1,42	56,67
$t_{\text{avg}}$ in ms	0,04	23,09
$t \geq 5$ ms	0,00 %	85,02 %

**Tabelle 1:** Latenzzeiten der Nachrichtenverarbeitung durch die Cloud.

Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse der dynamischen Zielführung. Im ersten Szenario (Abbildung 8a) mit normaler DSRC wird die ohne Baustelle beste Route gewählt, welche allerdings aufgrund der fehlenden Benachrichtigung durch die Baustelle führt. Es ergibt sich inklusive fünfminütiger Verzögerung eine Fahrtdauer von 7,67 min. Im zweiten Szenario (Abbildung 8b) ist die cloudbasierte V2X-Kommunikation verfügbar und es wird frühzeitig eine Route um die Baustelle herum gewählt. Das Ziel wird in 5,94 min und somit 1,73 min schneller als in Szenario 1 erreicht.



a: Optimale Route ohne cloudbasierte V2X-Kommunikation.



b: Optimale Route mit cloudbasierter V2X-Kommunikation.

**Abbildung 8:** Gegenüberstellung der gewählten Routen von Campus A zu Campus B ohne (a) und mit (b) cloudbasierter V2X-Kommunikation.

Die dargestellten Ergebnisse zeigen zum einen die Funktionsfähigkeit der Cloudinfrastruktur mit einer hinreichend kurzen Latenz von weniger als 5 ms, sodass kein signifikanter Aufschlag auf die Latenz der DSRC vorliegt. Zum anderen verifizieren und validieren sie die Integration der cloudbasierten V2X-Kommunikation in die dynamische Zielführung und demonstrieren den Mehrwert durch das Auffinden besserer Routen.

## 7 Resümee und Ausblick

In diesem Beitrag wurde eine auf MEC basierende Netzwerk- und Cloudinfrastruktur dargestellt, welche eine signifikante Reichweitenerhöhung der V2X-Kommunikation mittels DSRC erzielt. RSUs dienen als Schnittstelle zwischen Verkehrsteilnehmern und einer zentralen Cloud. Die Kommunikation zwischen RSUs und Verkehrsteilnehmern erfolgt mittels DSRC und zwischen RSUs und zentraler Cloud in IP-Netzwerken.

Zudem wurde in der dynamischen Zielführung eine Schnittstelle definiert, mit welcher die V2X-Nachrichten als dynamische Informationen in das Kartenmaterial der LDM integriert werden können. Basierend auf dem aktualisierten Kartenmaterial ist eine verbesserte Zielführung mit frühzeitiger Alternativroutenplanung möglich, wel-

che in Echtzeitsimulationen mithilfe einer Pilotanwendung am Standort Wolfenbüttel der Ostfalia nachgewiesen wurde.

Im Rahmen des Niedersächsischen Zukunftslabors Mobilität wird eine Weiterführung der dargestellten Forschungstätigkeiten angestrebt. Insbesondere soll das Potential der neu verfügbaren V2X-Informationen für eine kooperative Zielführung mehrerer Verkehrsteilnehmer zur Reduktion oder Vermeidung von Staus untersucht werden. Des Weiteren soll eine Integration der C-V2X-Kommunikation zur dynamischen Zielführung durchgeführt werden, da diese sich langfristig gegen die WLAN-basierte DSRC durchzusetzen scheint (vgl. Entzug der Frequenzbänder für DSRC in den USA [28]). In Hinblick auf diese Integration wurde die Schnittstelle zur Informationseinbindung in die LDM so definiert, dass eine nachträgliche Änderung der Kommunikationstechnologie mit geringem Aufwand möglich ist.

## Danksagung

Dieser Beitrag wurde im Rahmen des Verbundprojekts *Zukünftige Fahrzeugtechnologien im Open Region Lab* durch das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur sowie die VolkswagenStiftung unter dem Förderkennzeichen VWZN3236 gefördert.



Niedersächsisches Ministerium  
für Wissenschaft und Kultur



VolkswagenStiftung

## Referenzen

- [1] Scherler S, Pramme F, Liu-Henke X, Bicker G. iREX 4.0 – A contribution to a predictive, energy-optimal drive of Autonomous Electric Vehicles equipped with Range Extender by means of Cross-linking and Digitization. 16<sup>th</sup> Symposium on Hybrid and Electric Vehicles, Braunschweig, Germany, 20. - 21. Februar, 2019.
- [2] Velasco-Hernandez G, Caicedo-Bravo E, Barry J, Walsh J. Intersection Management Systems and Internet of Things: A Review. IEEE 16<sup>th</sup> Int. Conference on Intelligent Computer Communication and Processing, 2020.
- [3] Napolitano A, Cecchetti G, Giannone F, Ruscelli A L, Civerchia F, Kondepu K, Valcarengi L, Castoldi P. Implementation of a MEC-based Vulnerable Road User Warning System. AEIT Int. Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive, 2019.
- [4] Tong W, Hussain A, Bo W X, Maharjan S. Artificial Intelligence for Vehicle-to-Everything: A Survey. IEEE Access, Vol 7, S. 10823 – 10843, Januar 2019.
- [5] Naik G, Choudhury B, Park J-M, IEEE 802.11bd & 5G NR V2X: Evolution of Radio Access Technologies for V2X Communications, IEEE Access, Vol. 7, S. 70169 - 70184, Juni 2019.



- [6] Lembke R. DSRC und C-V2X im Vergleich. Automatisiertes Fahren, SpringerProfessional, <https://www.springerprofessional.de/automatisiertes-fahren/automobil-elektronik---software/dsrc-und-c-v2x-im-vergleich/15476434>. Stand: 06.03.2018.
- [7] Mannoni V, Berg V, Sesia S, Perraud E. A Comparison of the V2X Communication Systems: ITS-G5 and C-V2X. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), Kuala-Lumpur, Malaysia, April, 2019.
- [8] Perry F. Overview of DSRC Messages and Performance Requirements. UFTI DSRC and Other Communication Options for Transportation Connectivity Workshop, 03. Mai, 2017.
- [9] ETSI. ETSI TS 102 637-2, Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service, März 2011.
- [10] ETSI. ETSI TS 102 637-3, Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service, November 2014.
- [11] Masood A, Lakew D S, Cho S. Security and Privacy Challenges in Connected Vehicular Cloud Computing. IEEE Communications Surveys & Tutorials. Vol. 22, Nr. 4, 2020.
- [12] Nkenyereye L, Nkenyereye L, Islam S M R, Kerrache C A, Abdullah-Al-Wadud M, Alamri A. Software Defined Network-Based Multi-Access Edge Framework for Vehicular Networks. IEEE Access, Vol. 8, S. 4220 - 4234, 2020.
- [13] Dijkstra E W. A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. Numerische Mathematik. S. 269 - 271, 1959.
- [14] Bast H et al. Route Planning in Transportation Networks. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 9220, S. 19 - 80, 2016.
- [15] Dorigo M et al. Ant algorithms for discrete optimization. Artificial Life, Vol. 5, Nr. 2, S. 137 - 172, 1999.
- [16] Yu J, Yu W, Gu J. Online Vehicle Routing With Neural Combinatorial Optimization and Deep Reinforcement Learning. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 20, Nr. 10, Oktober 2019.
- [17] Schmidt M, Kwella B, Pieth N. TPEG löst TMC ab – Eine neue Generation der Navigation. ATZechnik, Vol. 4, Nr. 6, 2009.
- [18] Shimada H, Yamaguchi A, Takada H, Sato K. Implementation and Evaluation of Local Dynamic Map in Safety Driving Systems. Journal of Transportation Technologies, Vol. 5, S. 102 - 112, 2015
- [19] Liu-Henke X, Duym S. Modellgestützte Funktionsabsicherung des vernetzten mechatronischen Kraftfahrzeugs. VDI-Tagung Mechatronik, Wiesloch, 01./02. Juli, 2005.
- [20] Scherler S, Liu-Henke X. Conception and Realization of a Mobile HiL Test Bench for V2X Communication. IEEE 91<sup>st</sup> Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring), Virtual, May 25 - July 31, 2020.
- [21] Deutscher Verkehrssicherheitsrat e.V. Unfallstatistik. [www.dvr.de/service/unfallstatistik](http://www.dvr.de/service/unfallstatistik), Stand: 10.02.2021.
- [22] ETSI. ETSI TS 302 665, Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture, September 2010.
- [23] Hobert L, Festag A, Llatser I, Altomare L, Visintainer F, Kovacs A. Enhancements of V2X Communication in Support of Cooperative Autonomous Driving. IEEE Communication Magazine, S. 64 - 70, Dezember, 2015.
- [24] Farr T G. The Shuttle Radar Topography Mission. Reviews of Geophysics, 45, RG2004, 2007
- [25] OpenStreetMap Foundation. OpenStreetMap. [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org), Stand: 05.02.2021
- [26] Scherler S, Liu-Henke X. Intelligente Zielführung elektrischer Fahrzeuge mit Brennstoffzelle als Range Extender in vernetzten Verkehrssystemen. 25. Symposium Simulationstechnik, Virtual, 14./15. Oktober, 2020.
- [27] Pramme F, Scherler S, Kelm L R, Frank L, Bicker G, Liu-Henke X. Zukunft der Fahrzeugkommunikation - Fährst du schon oder stehst du noch? Ostfalia Campus als Testfeld für V2X-Kommunikation und automatisierte Fahrfunktionen. Embedded Software Engineering Kongress, Sindelfingen, Germany, 30. November - 04. Dezember, 2020.
- [28] Zivadinovic D. Autovernetzung: USA schicken 11p-WLAN in Rente. [www.heise.de/news/Autovernetzung-USA-schicken-11p-WLAN-in-Rente-4966174.html](http://www.heise.de/news/Autovernetzung-USA-schicken-11p-WLAN-in-Rente-4966174.html), Stand: 21.11.2020