



Schlussbericht - Robert Bosch GmbH

Verbundprojekt MEC-View

Mobile Edge Computing basierte Objekterkennung für hoch- und vollautomatisiertes Fahren

<http://mec-view.de/>

BMWi-Förderprogramm:

Hoch- und vollautomatisiertes Fahren für anspruchsvolle Fahrsituationen

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projektlaufzeit 01.12.2017 – 31.05.2020

Individueller Schlussbericht

Version 2, 30.11.2020

Zuwendungsempfänger:

Robert Bosch GmbH

Förderkennzeichen (Aktenzeichen):

19A16010A

Autoren (A-Z)

Nachname, Vorname

Digel, Holger	Robert Bosch GmbH, Chassis Systems Control (CC)
Gabb, Michael	Robert Bosch GmbH, Chassis Systems Control (CC)
Haug, Matthias	Robert Bosch GmbH, Corporate Sector Research (CR)
Henn, Rüdiger W.	Robert Bosch GmbH, Chassis Systems Control (CC)
Maier, Matthias	Robert Bosch GmbH, Chassis Systems Control (CC)
Müller, Tobias	Robert Bosch GmbH, Chassis Systems Control (CC)
Völz, Benjamin	Robert Bosch GmbH, Corporate Sector Research (CR)

Ergebnisverbreitung

- Öffentlich
- BMWi
- Projektträger
- Projektpartner

Dateiname 19A16010A_MEC-View_Schlussbericht_Bosch_V2

Seitenzahl 74

Inhalt

Einleitung	5
1. Gesamtzielsetzung und Aufgabenstellung	6
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	9
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	10
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	11
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	12
6. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses	13
6.1 AP1 Gesamtsystem	13
6.2 AP2 Digitale Karte, Dynamische Streckenfreigabe und Verhaltensanalyse	19
6.3 AP4 Infrastruktur-Sensorik	19
6.4 AP6 Automatisiertes Fahrzeug	20
7. Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	63
8. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	64
9. Voraussichtlicher Nutzen	65
10. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	66
11. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	67
Abbildungen	68



Schlussbericht - Robert Bosch GmbH

Tabellen	71
Literatur	72
Glossar	73



Einleitung

Der vorliegende Schlussbericht zum BMWi-geförderten Projekt MEC-View („Mobile Edge Computing basierte Objekterkennung für hoch- und vollautomatisiertes Fahren“) umfasst die Beiträge der Robert Bosch GmbH (BOSCH).

Das Projekt MEC-View wurde im Rahmen des BMWi-Fachprogramms „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“ mit dem inhaltlichen Schwerpunkt „hoch- und vollautomatisiertes Fahren für anspruchsvolle Fahrsituationen“ gefördert. BOSCH koordinierte die Arbeiten des Konsortiums.

Der Bericht ist wie folgt gegliedert: Das nachfolgende Kapitel enthält eine Kurzdarstellung zu Projektrahmen und Ablauf gemäß den Nebenbestimmungen für Zuwendungen auf Kostenbasis des Bundesministeriums für Bildung und Forschung an Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft für Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (NKBF) 98, Anlage 2, Teil I. Darin wird eine kurze Einführung in den MEC-View Ansatz gegeben, sowie die Zielsetzung und Aufgabenstellung des gesamten Projektes eingeleitet. Es folgen Informationen zu Projekt-Voraussetzungen und Ablauf. Im Anschluss werden der Stand der Technik, sowie die partnerspezifischen Aufgabenschwerpunkte der Robert Bosch GmbH nach Arbeitspaketen gegliedert dargestellt.

Die sich anschließenden Kapitel enthalten eine ausführliche Darstellung gemäß NKBF 98, Anlage 2, Teil II. Dort werden die von BOSCH durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse, gegliedert nach den Arbeits- und Unterarbeitspaketen, im Detail beschrieben. Im Schlussteil des Berichtes werden die wichtigsten Positionen zum zahlenmäßigen Nachweis, Informationen zum Verwertungsplan und den Erfolgsaussichten, sowie zu durchgeführten Maßnahmen zur Ergebnisverbreitung zusammengefasst.

1. Gesamtzielsetzung und Aufgabenstellung

Das Projekt MEC-View hat sich zum Ziel gesetzt, das automatisierte Fahren, SAE (J3016) L3, auf urbane Verkehrsräumen zu erweitern. In vorherigen Forschungsprojekten wurden bereits Systeme zur Teilautomatisierung (u.a. UR:BAN) oder auch höhere Automatisierung auf Autobahnen oder ländlichen Verkehrsarmen (u.a. Ko-HAF, IMAGinE) adressiert. Der urbane Verkehrsraum konnte aufgrund seiner komplexen Gegebenheiten in Bezug auf die Verkehrsszenarien für das automatisierte Fahren bisher nicht erschlossen werden. Hochautomatisierte Systeme bieten jedoch einen sehr viel höheren Kundennutzen, wenn sie insbesondere auch im städtischen Gebieten (Wirkfelderweiterung) eingesetzt werden können.

MEC-View adressierte die Problemstellung der verdeckten Bereiche in urbanen Verkehrsszenen: Aufgrund von Verdeckungen können viele Bereiche einer urbanen Verkehrsszene mit der fahrzeugeigenen on-board Sensorik zeitweise oder dauerhaft nicht erfasst werden. Somit können auch die sich in diesen Bereichen befindlichen für die Prädiktion des Szenenablaufes relevanten, dynamischen Verkehrsteilnehmer und statische Objekte nicht in der Szenenprädiktion berücksichtigt werden. Auch das zeitliche Verhalten des automatisierten Fahrzeugs über die notwendige (szenenspezifische) Zeitspanne kann daher nicht hinreichend geplant werden.

Die MEC-View Partner verfolgten den im Anschluss skizzierten Ansatz, um das Problem der verdeckten Bereiche zu lösen: Durch den Einsatz von infrastrukturseitig verbauten Sensoren (Video- und LiDAR-Sensoren) sollen abstrahierte, anonymisierte Informationen über relevante Verkehrsteilnehmer und Objekte über ein performantes Mobilfunknetz an einen Mobile Edge Computing (MEC-)Server gesendet werden. Dieser Server soll den automatisierten Fahrzeugen ein georeferenziertes Umfeldmodell aller relevanten Verkehrsteilnehmer im Sichtbereich der Infrastruktursensorik zur Verfügung stellen. Zusammen mit den Daten der On-board-Sensoren und einer hochauflösenden digitalen Karte kann das automatisierte Fahrzeug ein umfassendes Modell der Umgebung erstellen und die Aufgaben der Szenenprädiktion und Verhaltensplanung lösen. Mit diesem Ansatz soll die Verkehrseffizienz und -sicherheit optimiert werden und das Potenzial der Hochautomation auch in Stadtgebieten erschlossen werden. Ermöglicht wurde dieses Konzept insbesondere durch die rasanten Entwicklungen in den Bereichen der Mobilfunk-Technologien (LTE, 5G), der Bild- und Signalverarbeitung bei leistungsfähigen Umfeldsensoren sowie durch die enorme Steigerung der Rechenleistung von Servern der Infrastruktur, aber auch der Steuergeräte in Fahrzeugen.

Auf Grundlage dieses konzeptionellen Ansatzes wurden die Aufgaben des Projektes definiert: Nach einer eingehenden Analyse und Auswahl des MEC-View-Use-cases (automatisiertes Auffahren von einer Nebenstraße auf eine Hauptstraße) wurde der Aufbau der Pilot-Anlage in Ulm-Lehr geplant und umgesetzt. Die notwendige Infrastruktur der Anlage besteht aus Sensoren an Leuchtenmasten inklusive Mess- und Auswerteeinheiten, Kommunikationseinrichtungen über ein prototypisches Mobilfunknetz sowie einem MEC-Server.

Die Forschungstätigkeiten zur Umsetzung dieses Ansatzes wurden in MEC-View in sechs Arbeitspaketen (AP) gegliedert, die ihrerseits zur Koordination der operativen Ausführung in Unterarbeitspakete (UAP) strukturiert wurden. Das nachfolgende Kapitel gibt eine kurze Zusammenfassung der APs und der darin verfolgten Ziele. BOSCH fokussierte auf den konzeptionellen Arbeiten in AP1 sowie die Entwicklung der automatisierten Fahrfunktionen zur Darstellung des MEC-View Use-cases in AP6. Für diese beiden APs übernahm BOSCH die Rolle der AP-Leitung.

AP1 – Gesamtsystem

AP1 „Gesamtsystem“ dient dabei als ein zentrales Element, indem es auf die Beteiligung aller Partner ausgerichtet ist und darauf fokussiert, auf Basis einer gemeinsamen Detaillierung des Use-Cases, die Anforderungen an das Gesamtsystem und die Komponenten abzuleiten und die gemeinsame Generierung von Größen für die Fortschrittverfolgung vorzunehmen. Ebenfalls liegt es im Fokus von AP1, Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten des Gesamtsystems logisch zu beschreiben. Die Umsetzung der Schnittstellen als auch die inhaltliche Bearbeitung der Lösungen der Komponenten erfolgt in den weiteren Arbeitspaketen des Projektes, die in Anlehnung an Abb. 1 nach den wesentlichen Komponenten des Gesamtsystems strukturiert

Schlussbericht - Robert Bosch GmbH

sind: digitale Karte, Kommunikationsnetz, Infrastruktursensorik, MEC-Server und automatisiertes Fahrzeug. Neben der Leitung des Arbeitspaktes trug BOSCH zur Entwicklung des Gesamtsystem-Konzeptes, der Ableitung der Anforderungen aus dem zuvor definierten Anwendungsfall bei. Gemäß dem zuvor definierten Anforderungsfluss trug BOSCH zur Definition der Schnittstellen aus Sicht des automatisierten Fahrzeugs bei.

AP2 – Digitale Karte, Dynamische Streckenfreigabe und Verhaltensanalyse

AP2 „Digitale Karte, Dynamische Streckenfreigabe und Verhaltensanalyse“ zielt auf die Generierung einer hochgenauen statischen Karte für die Lokalisierung und Verhaltensplanung für digitale Fahrzeuge auf urbanen Verkehrswegen. Diese wird als unmittelbare Eingangsgröße für den MEC-Server, als auch das automatisierte Fahrzeug benötigt. Ferner erarbeitete AP2 auf Basis mikroskopischer Verkehrsdaten Lösungen für eine Automatisierung der Streckenfreigabe und Ableitung von Verhaltensweisen für die automatisierten Fahrzeuge. Zum AP2 trug BOSCH zur Erstellung einer dynamischen digitalen Karte bei, die auf Basis einer HD-Map von TOMTOM für das Projekt MEC-View überarbeitet und angepasst wurde.

AP3 – Kommunikationsnetz

AP3 „Kommunikationsnetz“ wird die HW-technischen und SW-technischen Voraussetzungen für die Vernetzung von Infrastruktursensorik, (Mobile Edge Computing) MEC-Server und automatisiertem Fahrzeug umsetzen und dabei Forschungsfragen zur Reduktion der Übertragungszeiten lösen. Nokia stellte den MEC-View Partnern ein prototypisches LTE-Netz mit ersten 5G-Merkmalen zur Verfügung, in dessen Reichweite die MEC-View Pilotanlage (Ulm-Lehr) positioniert wurde. Außerdem wurden im AP3 die Kommunikationsmodule für die Infrastruktursensorik an den Straßenleuchten (AP4) und für die Anbindung der automatisierten Fahrzeuge an das prototypische Mobilfunknetz bereitgestellt. Auch die MEC-Server Hardware für MEC-View wurde im AP3 aufgebaut. Die Robert Bosch GmbH hatte in diesem Arbeitspaket keine Beiträge geplant und hat auch keine nennenswerten Beiträge geleistet.

AP4 – Infrastruktursensorik

AP4 „Infrastruktursensorik“ umfasst alle Arbeiten zur HW-technischen Installation und Inbetriebnahmen von LiDAR- und Videosensoren an Straßenleuchten und zur Entwicklung von Algorithmen zur Detektion, Klassifikation und Georeferenzierung dynamischer Objekte. Des Weiteren wurde ein unabhängiges Referenz-Sensorsystem konzipiert und aufgebaut, das mit Referenz-Tests die Performance der obigen LiDAR- und Videosensoren bewerten sollte. BOSCH brachte sich in die Konzept-Entwicklung des Referenz-Sensorsystems ein und beschaffte die dafür notwendige Video-Sensoren.

AP5 – MEC-Server

Im AP5 „MEC-Server“ wurden die Softwaremodule für den MEC-Server (AP3) entwickelt, deployed und in Betrieb genommen: auf Basis der dynamischen digitalen Karte (AP2) und den einzelnen Detektionen der Infrastruktur-sensoren (AP4) wurde mittels MEC-Server (AP3) ein lokales Umfeldmodell berechnet. In einem Tracking-Modul wurden die Pfade der relevanten Objekte des Umfeldmodells prädiert. Diese Informationen wurden dann über die in AP1 definierte Schnittstelle den automatisierten Fahrzeugen (AP6) transferiert. Zur Entwicklung und Optimierung des Gesamtsystems wurde ein Web-basiertes Visualisierungstool zur Verfügung gestellt. BOSCH lieferte zu diesem Arbeitspaket keine Beiträge.

AP6 – Automatisiertes Fahrzeug

AP6 „automatisiertes Fahrzeug“ bedient sämtliche Aspekte des funktionalen Netzwerkes eines automatisierten Fahrzeuges und legt einen wissenschaftlichen Schwerpunkt auf die vorteilhafte Verwendung der MEC-Server-Umfeldobjekte für eine robustere und kundenwertigere Auslegung eines urbanen HAF-Systems. BOSCH legte in MEC-View den inhaltlichen Schwerpunkt auf dieses Arbeitspaket. Zunächst wurde ein HAF Fahrzeug-Prototyp mit geeigneten onboard-Sensoren, Eigenlokalisierungseinheit sowie Aktoren und Algorithmen für das automatisierte Fahren aufgebaut und in Betrieb genommen. Die in AP3 entwickelte CCU wurde im BOSCH-Fahrzeug integriert, um Objekt-Daten des MEC-Server Umfeldmodells empfangen zu können. Die Umfeldsensordaten wurden mit den on-board-Sensordaten im Perceptions-Modul fusioniert und



Schlussbericht - Robert Bosch GmbH

für die Szenenprädiktion und Verhaltensplanung genutzt. Mit diesen Erweiterungen der automatisierten Fahrfunktion konnte der MEC-View use cases „automatisiertes Auffahren auf eine vorfahrtberechtigte Straße“ dargestellt, optimiert und demonstriert werden.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt MEC-View wurde in einem Partner-Verbund aus Automobilherstellern, Zulieferern, Unternehmen der Informationstechnologie, universitären Forschungsanstalten und KMUs bearbeitet. Das geplante Gesamtprojektvolumen betrug 12,8 Mio € wobei das Projekt mit etwa 6,8 Mio € vom BMWi gefördert wurde. Die Förderquote des BMWi lag bei ca. 50 %. Hierbei betrug der BOSCH Volumenanteil etwa 3,1 Mio € und der Förderanteil 1,3 Mio €.

Die TÜV Rheinland Consulting GmbH wurde vom BMWi als Projektträger bestellt und unterstützte in dieser Rolle den Projektablauf. Die Rolle des Projektkoordinators von MEC-View war der Robert Bosch GmbH zugewiesen. Das Partnerkonsortium formierte sich aus den folgenden Partner-Organisationen:

- Daimler AG
- IT-Designers GmbH
- Nokia Solutions and Network GmbH & Co. KG
- OSRAM GmbH
- Robert Bosch GmbH
- Robert Bosch Car Multimedia GmbH
- TomTom Location Technology Germany GmbH
- Universität Duisburg-Essen, Lehrstuhl für Physik von Transport und Verkehr
- Universität Ulm, Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik

Folgende Kenntnisse waren bei der Robert-Bosch GmbH bei Projektstart als Voraussetzung zur erfolgreichen Umsetzung der Projekt-Aufgaben gegeben:

- Vorkenntnisse zu Aufbau und Betrieb automatisierter Fahrzeug-Prototypen
- Know-How und Erfahrung im Bereich der on-board Sensorik, insbesondere für Radar-, LiDAR und Kamera-Sensoren.
- Know-How zu automatisierten Fahrfunktionen nach Stand der Technik. Insbesondere theoretisches Hintergrundwissen zu formalen Ansätzen und Methoden der Umfeld-Perzeption, Daten-Fusion, Szenenprädiktion sowie Eigenbewegungsplanung.
- Theoretisches Hintergrundwissen und praktische Erfahrung im Bereich der Erstellung und Einbindung von HD-Maps sowie Eigenfahrzeug-Lokalisierung.
- Kompetenz und Erfahrung in Bereich Simulation, insbesondere dem Einsatz von Modellen.
- Kompetenz in Projektmanagement und Koordination großer Forschungsvorhaben, auch in Verbundprojekten.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

MEC-View startete am 01.12.2016 und endete nach einer Verlängerung um 6 Monate am 31.05.2020. Die mittelneutrale Verlängerung des Projektes wurde Anfang 2019 beantragt und vom Fördergeber genehmigt. Wesentliche Ursache für die Verlängerung der Projektlaufzeit waren unabsehbare und damit ungeplante Aufwände bei der Errichtung der Pilot-Anlage in Ulm-Lehr.

Die Arbeiten des Projektes MEC-View wurden, wie in Abschnitt 1 erläutert, in sechs Arbeitspakete strukturiert. Der zeitliche Ablauf des Projektes lässt sich in drei Phasen gliedern. Die nach dem Schrägstrich angegebenen Zeiträume zeigen die vom ursprünglichen Plan abweichenden Zeiträume aufgrund der mittelneutralen Verlängerung.

- Spezifikations- und Konzeptphase (12.2016 – 11.2017)
- Implementierungsphase (12.2017 – 11.2018 / 12.2017 - 02.2019)
- Verifikations- und Optimierungsphase (12.2018 – 11.2019 / 03.2019 - 05.2020)

Der ursprünglich budgetierte Finanzrahmen konnte auch in der mittelneutralen Verlängerung ohne größere Abweichungen eingehalten werden. Der Projektfortschritt wurde von den Partnern in halbjährlichen Berichten dargelegt.

Die Halbzeitpräsentation des Projektes fand am 18.07.2018 an der Universität Ulm statt. Die bereits geplante Abschlusspräsentation am 12.05.2020 konnte wegen der COVID-19-bedingten Versammlungsbeschränkungen und Lock-Down-Situation bei einigen Partnern nicht vor Ort stattfinden. Stattdessen veröffentlichten die Partner ihre Projektergebnisse auf der MEC-View Homepage www.mec-view.de.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Der wissenschaftlich-technische Stand, an den das MEC-View Konsortium zu Projektbeginn angeknüpfte, speist sich im Wesentlichen aus den umfangreichen Vorarbeiten im Bereich des hochautomatisierten Fahrens. Diese Vorarbeiten fokussierten auf fahrbare Prototypen mit zu diesem Zeitpunkt serienferner Sensorik. Dabei wurden sowohl Vorerfahrungen in der Auslegung und dem Betrieb von Backend-Systemen im Kontext der Erfassung und Konsolidierung von Fahrzeugsensordaten gesammelt, als auch die Fahrfunktion selbst prototypisch erprobt. Bei der Infrastruktursensorik wurden die zu Projektbeginn aktuellen Verfahren der Bilderkennung auf der Basis maschinellen Lernens als Startpunkt verwendet. Das Mobilfunknetz basierte auf implementierten Features des 3GPP Standard Release 14 und den damit verfügbaren Möglichkeiten einer Latenzoptimierung. Integrationsmöglichkeiten von MEC im Mobilfunknetz orientierten sich an entsprechenden ETSI-Spezifikationen.

Neben den internen Vorarbeiten bei den Partnern, bestand ein umfangreicher Teil des Standes der Technik in den Erkenntnissen aus vor MEC-View begonnenen, öffentlich geförderten Projekten. Dort wurde ein Wissenstand aufgebaut, der einerseits das hochautomatisierte Fahren zum jeweiligen Zeitpunkt behandelte und andererseits weiteren Forschungs- und Innovationsbedarf für die in MEC-View zu behandelnden Gebiete auswies. Die folgenden öffentlich geförderten Projekte waren für MEC-View von Bedeutung:

- BMWi: AKTIV-AS (2006 - 2010)
- EU: HAVEit (2008 - 2011)
- BMWi: Ko-FAS (2009 - 2013)
- EU: interactIVe (2010 - 2013)
- BMWi: UR:BAN (2012 - 2016)
- EU: D3CoS (2011 - 2014)
- BMBF / BMWi: simTD (2009 - 2013)
- BMBF / BMWi: CONVERGE (2012 - 2015)
- BMBF: InCarIn (2014 - 2017)
- EU: AdaptIVe (2014 - 2017)
- BMWi: Ko-HAF (2015 - 2018)
- BMWi: IMAGinE (2016 - 2022)
- BMBF: I2EASE (2016 - 2018)
- EU: 5G-TRANSFORMER (2017 - 2019)
- BMBF: 5G-NETMOBIL (2017 - 2020)

Zur Beantragungszeit (2016) wurde das automatisierte Fahren nach SAE L3 auf Autobahnen und Landstraßen erforscht. Die Szenenstellung erfolgte meist auf abgesperrten Teststrecken oder für den öffentlichen Verkehr eingeschränkten Anlagen.

Entsprechender Forschungsbedarf für das automatisierte Fahren in komplexen Situationen urbaner Verkehrsräume wurden vom MEC-View Konsortium abgeleitet und in der Vorhabenbeschreibung formuliert. Insbesondere die Erweiterung der AD-Funktion auf komplexe städtische Szenarien und die Erprobung prototypischer Ansätze an einer Pilotanlage im Realverkehr stellen die wesentlichen Erweiterungen des Standes der Technik dar.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit von MEC-View fanden Kommunikation und Zusammenarbeit mit anderen Stellen auf mehreren Ebenen statt.

Projektintern wurden einerseits durch Konsortiums-übergreifende Regelmeetings die Projektinhalte und -Ziele koordiniert und abgestimmt. Andererseits fand in regelmäßigen Skype-Meetings, Projekttreffen sowie gemeinsamen Treffen zu Fahrversuchen oder zur Datenaufnahme in Ulm die inhaltliche Zusammenarbeit in den Arbeitspaketen statt. Da die in MEC-View bearbeiteten Inhalte großes Potential für neue Forschungsfragen hatten, wurde hier von BOSCH Seite eng mit der UULM zusammengearbeitet, um gemeinsame Paper zu veröffentlichen. Auf diese und weitere Publikationen mit BOSCH Beteiligung in MEC-View wird an dieser Stelle auf Kapitel 11 verwiesen.

Unabhängig der MEC-View-Projektpartner wurden BOSCH intern die erzielten Ergebnisse kommuniziert und auf die zum Wissen- und Ergebnistransfer relevanten Bereiche und Projekte zugegangen. Insbesondere zu nennen ist die Zusammenarbeit und Diskussion relevanter Themen mit weiteren öffentlich geförderten Projekten, an denen BOSCH beteiligt ist. Als Beispiele zu nennen sind die Projekte EVA-Shuttle, Ko-HAF und IMAGinE.

Zusätzlich fand die Präsentation und Diskussion der MEC-View-Inhalte auch im Rahmen von wissenschaftlichen Tagungen statt. So sei beispielhaft die „Special Interest Session“ mit Vorträgen von BOSCH mit anschließender öffentlicher Diskussion auf dem ITS World Congress in Kopenhagen, 2018, genannt. Weitere Publikationen sind im Kapitel 11 aufgeführt.

6. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses

Wie im vorangegangenen Kapitel erläutert, hat die Robert Bosch GmbH zu den MEC-View Arbeitspaketen AP1, AP2, AP4 und AP6 Beiträge geleistet und Projektziele verfolgt. Die Arbeitsschwerpunkte legte die Robert Bosch GmbH auf die Arbeitspakete AP1 und AP6, für die BOSCH auch die Rolle des Arbeitspaketleiters übernahm.

Dieses Kapitel dient einerseits der Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten und Beiträge, sowie der inhaltlichen Schilderung der erreichten Ergebnisse. Beiträge und Koordinationsaufwände von BOSCH im Rahmen der Arbeits- und Unterarbeitspaketleitung (AP1, sowie AP6) sind in dieser inhaltlichen Zusammenfassung bewusst nicht enthalten. Die Gliederung des Kapitels folgt dabei der oben beschriebenen, groben Unterteilung nach Arbeitspaketen und schließlich der Unterteilung nach Unterarbeitspaketen.

6.1 AP1 Gesamtsystem

Das Arbeitspaket „AP1 Gesamtsystem“ umfasst vier Unterarbeitspakete

- UAP1.1 Requirements Engineering
- UAP1.2 Fortschrittverfolgung
- UAP1.3 Pilotanlage Ulm
- UAP1.4 Projektmanagement, Dokumentation und Ergebnisverbreitung

Das „AP1 Gesamtsystem“ wurde über die gesamte Laufzeit des Projekts bearbeitet, da mehrere Iterationszyklen aus Anforderungsanalyse und Integration mit steigender Komplexität durchgeführt wurden (s. VDI Richtlinie 2206). Die Evaluation der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems erfolgt daher anhand der fortlaufenden Integration der einzelnen Subsysteme (Abb. 1) und prototypischer funktionalen Tests.

Im „UAP1.1 Requirements Engineering“ spezifizieren die Partner detailliert die System- und Subsystemanforderungen bzgl. der adressierten Fahrhandlungen in definierten Szenarien wie z.B. dem Auffahren auf eine vorfahrtberechtigte Straße. Die Anforderungen auf Gesamtsystemebene bilden die Basis für den Aufbau und die Bewertung des „integrierten Versuchsträgers“, bestehend aus zwei automatisierten Fahrzeugen (AP6), Kommunikationsnetz (AP3), MEC-Server (AP5) sowie Infrastruktur-Sensorik (AP4).

Um den Projektfortschritt und die Ergebnisreichung zu verfolgen und zu dokumentieren werden im „UAP1.2 Fortschrittverfolgung“ die benötigten technischen Kennzahlen (KPIs) definiert. Diese bilden die Basis für die auch in diesem AP durchgeführte Evaluation und Demonstration des Gesamtsystems auf den verschiedenen Ebenen von der Simulation bis hin zum Test an der MEC-View Pilotanlage in Ulm-Lehr (Abschnitt 5.1.3).

In „UAP1.3 Pilotanlage Ulm“ sind Auswahl, Konzeptentwicklung und Umsetzungsplanung der MEC-View Pilotanlage zusammengefasst. Diese Aktivitäten wurden von BOSCH koordiniert und betrafen in der Umsetzung hauptsächlich die Partner OSRAM und Universität Ulm.

Schließlich wurde im „UAP1.4 Projektmanagement, Dokumentation und Ergebnisverbreitung“ der formale Rahmen zur Koordination des Projekts festgelegt.

6.1.1 UAP1.1 Requirements Engineering - Anforderungsentwicklung

Aufgrund des hohen Vernetzungsgrades der Komponenten des MEC-View Gesamtsystems war ein hoher Koordinationsaufwand notwendig, um ein gemeinsames Verständnis der Systemstruktur, logische Abhängigkeiten der Subsysteme, bzw. Komponenten und Signalflüsse zu erreichen.

Im Folgenden sind die Schritte dargestellt, die BOSCH als AP-Leiter des AP1 zusammen mit den Partnern unternahm, um dieses Ziel zu erreichen. Dabei wurde die Strategie verfolgt, schrittweise in einem sequenziellen Ablauf vom Allgemeinen ins Detail das Gesamtsystem zu beschreiben:

1. Gesamtsystem-Beschreibung mit allen Subsystemen und Signalpfaden
2. Klärung der logischen Abhängigkeiten und gegenseitigen Anforderungen der Subsysteme
3. Ausspezifizierung der logischen und physikalischen Schnittstellen.

Die Anforderungen an die System-Komponenten des MEC-View Gesamtsystems wurden in einer Workshop-Reihe mit Beteiligung aller Partner abgeleitet. Ziele der WS war es, die Abhängigkeiten im Gesamtsystem im Detail zu identifizieren und den Arbeitsmodus zur Anforderungsentwicklung festzulegen.

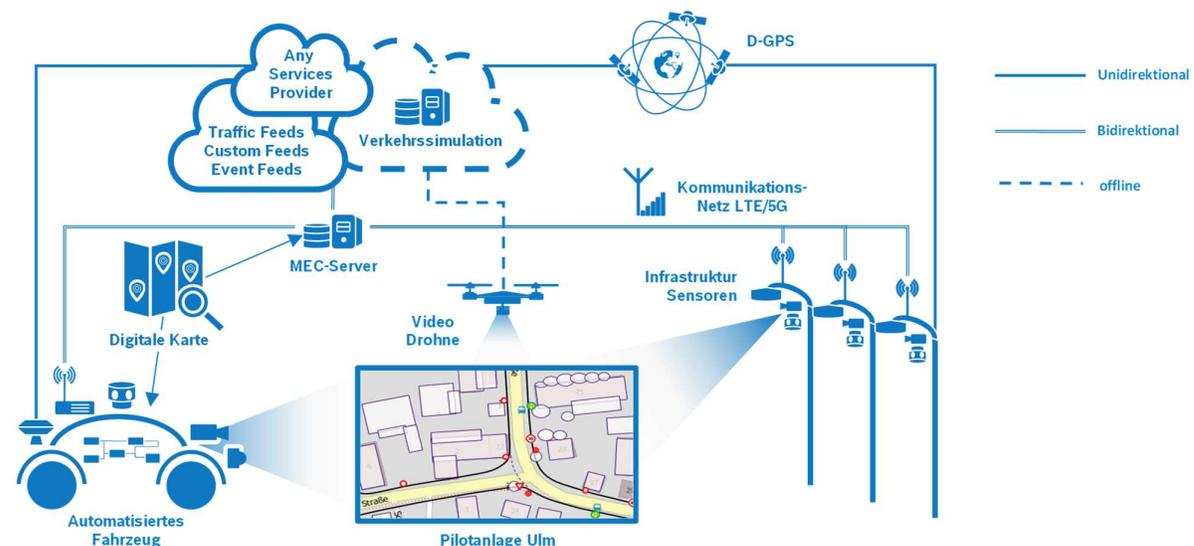


Abb. 1: MEC-View Gesamtsystem-Architektur mit Subsystemen und Signalpfaden

Die MEC-View Gesamtsystem-Architektur (Abb. 1) umfasst die folgenden Subsysteme:

- Infrastruktur-Sensoren (Video und LiDAR) inklusive Referenzmesssystem
- MEC-Server
- Automatisierte Fahrzeuge
- LTE/5G Test-Mobilfunk-Netz
- Mobilfunkmodule für Automatisiertes Fahrzeug und Infrastruktur-Sensoren
- Pilotanlage
- Digitale Karte
- Backend mit Services für Streckenfreigabe und Verkehrssimulation
- D-GPS

Schlussbericht - Robert Bosch GmbH

Ausgehend von der Gesamtsystem-Architektur (Abb. 1) und den hier definierten Subsystemen wurde eine Anforderungsmatrix (Abb. 2) erstellt, aus der die wechselseitigen Abhängigkeiten der Subsysteme sowie deren logische und physikalische Schnittstellen abgeleitet werden konnten. In dieser Matrix konnten vier Schwerpunkt-Themenbereiche identifiziert werden, die im Wesentlichen unabhängig voneinander ausgearbeitet werden konnten (farbliche Markierungen der Anforderungsmatrix).

In vier Teams wurden diese Schwerpunkt-Themenbereiche im Verlauf des ersten Halbjahres 2017 bearbeitet und die Anforderungen sowie Spezifikation der Subsysteme und deren Schnittstellen (logisch, physikalisch) für MEC-View entwickelt. BOSCH übernahm die Leitung des Teams 1 und beteiligte sich an den Teams 2 und 4.

		Anforderungs-Nehmer																		
		Pilotanlage UIm	Stai/Dyn Digitale Karte	Dyn. Streckenfriergabe	Verhaltensanalyse	Mobilfunk Netz	MEC-Server HW	Cloud-Server HW	Mobilfunk-Module für Infrastr. Sensoren	Mobilfunk-Module für Fahrzeuge	Infrastruktur-Kamera	Infrastruktur-Lidar	Integration in Straßen-Leuchten	Referenz-Messsystem	MEC-Server Architektur & SW (C2X Objekt IF)	Autom. Fahrzeug	Unabhängig			
Anforderungs-Steller	Pilotanlage UIm		Infrastruktur-Anforderungen			Verfügbarkeit und Abdeckung											Fzg muss mit Strecke zureichkommen (Ampeln ...)	Team 1		
	Stai/Dyn Digitale Karte																	Team 2		
	Dyn. Streckenfriergabe	Archivierung von Daten aus dem Testfeld						Archivierung von historischen dynamischen Karten-Daten										Wunsch: Objektdaten im Fzg-Koordinatensystem	Team 3	
	Verhaltensanalyse	Archivierung von Daten aus dem Testfeld						Archivierung von historischen dynamischen Karten-Daten											Wunsch: Objektdaten im Fzg-Koordinatensystem	Team 4
	Mobilfunk Netz	Verfügbarkeit und Abdeckung																		
	MEC-Server HW																			
	Cloud-Server HW																	Bereitstellung der historischen dynamischen Unfelddaten		
	Mobilfunk-Module für Infrastruktur Sensoren						Kompatibilität Funkmodul / CCU	Latenz, Schnittstelle, Protokoll			Transferierbarkeit des Funk-Moduls	Schnittstelle Sensoren	Schnittstelle Sensoren					Schnittstellen Datentypen ... siehe API4		
	Mobilfunk-Module für Fahrzeuge						Kompatibilität Funkmodul / CCU	Latenz, Schnittstelle, Protokoll										Schnittstellen Datentypen ... siehe API6	Schnittstelle zu Fahrzeug	
	Infrastruktur-Kamera	Daten-Anbindung Stromversorgung, Position und Masten-höhe	Referenz auf der Karte Kartenmodell								Interfaces Datenraten							Verfügbarkeit der Daten		
	Infrastruktur-Lidar	Daten-Anbindung Stromversorgung, Position und Masten-höhe	Referenz auf der Karte Kartenmodell								Interfaces Datenraten							Verfügbarkeit der Daten		
	Integration in Straßen-Leuchten	Leuchtaustausch muss möglich sein									Einbaugröße Integration									
	Referenz-Messsystem	Bestromung Datenkabel Messtechnik-Schnittstelle									Daten Typen							Datenformat Zykluszeit		
	MEC-Server Architektur & SW (C2X Objekt IF)		Datenformat					Ressourcen	Datenformat									Datenformat Zykluszeit	Datenformat Zykluszeit	
	Autom. Fahrzeug	use case umsetzbar									Physikalische Anbindung Daten Latenz	Latenz Genauigkeit	Latenz Genauigkeit					Anforderungen an Ground Truth -> Verbindung an MEC-Server	Latenz Fusionierte Objekte NDKIA -> Referenz für Server -	

Abb. 2: Anforderungsmatrix der MEC-View Subsysteme. Vier Teams erarbeiten die Anforderungen an und Schnittstellen zwischen den Subsystemen.

Team 1 „Pilotanlage und Use Case“ (gelbe Felder in Abb. 2) spezifizierte die Anforderungen an den MEC-View-Use-Case und die Pilot-Anlage in Ulm. Abb. 3 zeigt eine schematische Darstellung (Aufsicht) des MEC-View-Use-Cases „Automatisches Auffahren auf eine Vorfahrtstraße“. Basierend auf den Informationen zu den Fahrzeugen auf der Vorfahrtstraße (Position, Geschwindigkeit, Abstände, Heading-Vektor etc.), die von den Infrastruktursensoren an den Leuchten-Masten (rote Kreise) über den MEC-Server an das automatisierte Fahrzeug (rotes Dach) weitergegeben werden, fährt das automatisierte Fahrzeug möglichst ohne anzuhalten in eine geeignete Lücke des Verkehrs auf die Vorfahrtstraße auf. Dieses Szenario wurde aus einer Use-Case-Analyse verschiedener anspruchsvoller Fahrsituationen an der Pilotanlage ausgewählt.

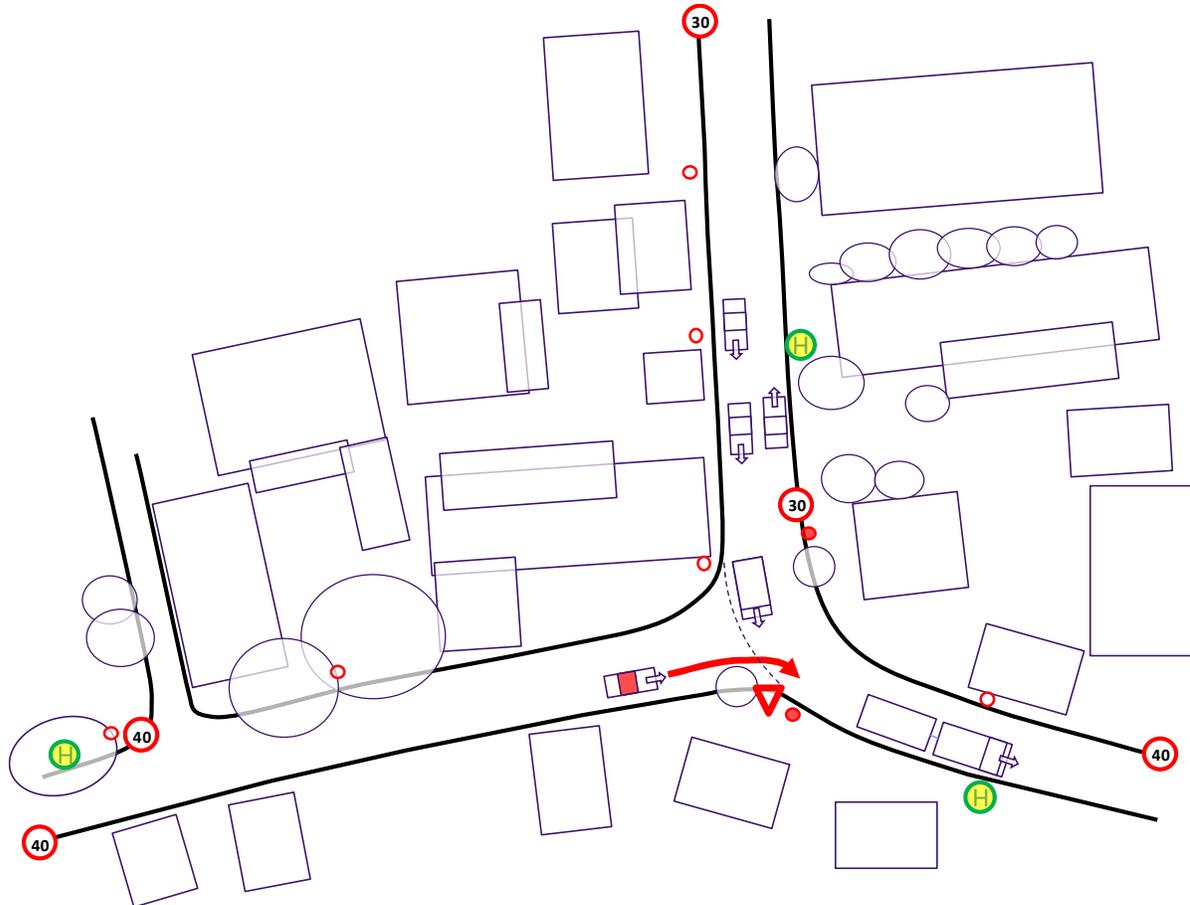


Abb. 3: Schematische Darstellung des MEC-View-Use-case „Auffahren auf eine Vorfahrtstraße“ an der ausgewählten Pilotanlage.

Team 2 „Digitale Karte, Verhaltensanalyse und dynamische Streckenfreigabe“ (blaue Felder in Abb. 2) hat sich an der Spezifikation des Kartenformates für die statische digitale Karte der Pilotanlage beteiligt, die von TOMTOM bereitgestellt wurde. Das vereinbarte Kartenformat basiert auf einer bereits bestehenden Spezifikation zwischen BOSCH und TOMTOM und weist zusätzliche Merkmale auf, die für die Darstellung des MEC-View Use-Cases notwendig sind.

Team 3 „Kommunikationsschicht“ (grüne Felder in Abb. 2) bearbeitete die Anforderungen und Schnittstellen des Mobilfunk-Netzes, MEC-Server HW und Mobilfunk-Module. BOSCH hatte keine Beiträge zu diesen Arbeitspunkten vereinbart und geleistet. Die von BOSCH gestellten allgemeinen Anforderungen zu Latenzen und Bandbreiten wurden bei der Anforderungsentwicklung der Schnittstellen berücksichtigt.

Schlussbericht - Robert Bosch GmbH

Team 4 „Infrastruktur-Sensorik, MEC-Server SW, automatisiertes Fahrzeug“ (braune Felder in Abb. 2): Um Synergien bei der Spezifikation der Objekt-Daten Schnittstellen zwischen Infrastruktur-Sensorik und MEC-Server einerseits sowie MEC-Server und automatisierten Fahrzeugen andererseits zu nutzen, wurden diese Spezifikationen in einem Team gemeinsam vorangetrieben. Letztendlich stellte sich aber heraus, dass die Anforderungen an die beiden Objektdaten-Schnittstellen (Abb. 4) zu stark divergieren. Es wurden daher für jede der oben genannten Schnittstellen eine eigene, separate Spezifikation erarbeitet.

Die physikalischen und logischen Schnittstellen zwischen den Subsystemen wurden wie in Abb. 4 dargestellt definiert und spezifiziert. Die Schnittstellen wurden in den entsprechenden Subsystemen der Partner implementiert und gemeinsam getestet.

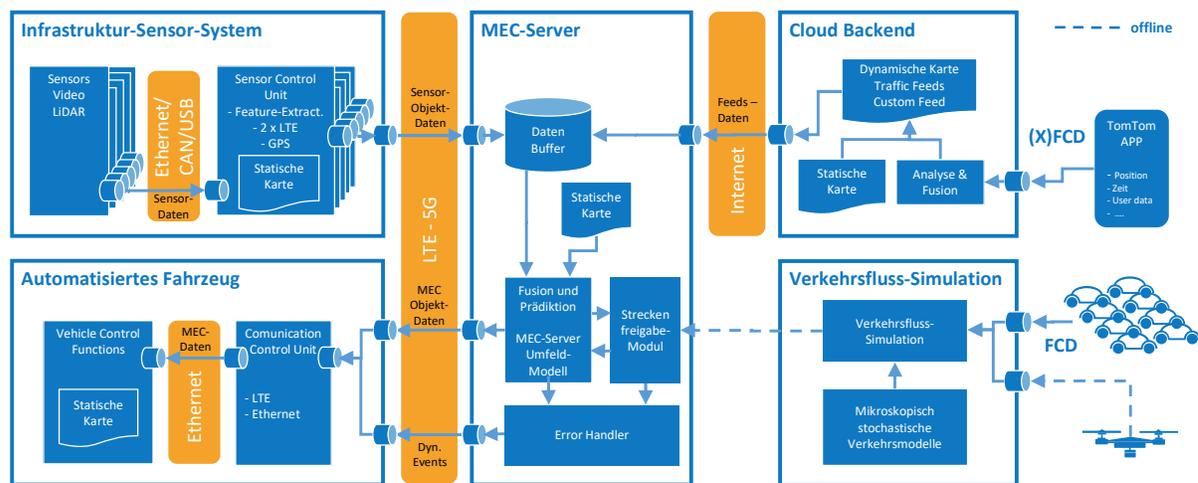


Abb. 4: Signalfluss-Modell des MEC-View Systems

6.1.2 UAP1.2 Fortschrittsverfolgung

Das MEC-View Konsortium hat sich darauf verständigt, den Projektfortschritt an Key-Performance-Indikatoren (KPIs) für das Gesamtsystem sowie die Subsysteme zu messen. Für jedes AP wurde ein Satz von KPIs definiert, die von den jeweiligen AP-Leitern spezifiziert und im Laufe des Projektes verfolgt wurden.

Die Gesamtsystem-Latenz der Signal-Propagation und Verarbeitung ist zur Darstellung des Nutzens der Infrastruktur-Sensorik für den MEC-View Use Case eine ausschlaggebende Größe (Abb. 5). Eine Zielgröße für die Gesamtsystemlatenz, abgeleitet aus Analysen der Objektdynamik des MEC-View Use Cases, wurde mit 200ms spezifiziert. Dem entsprechend mussten die Latenz- und Delay-Budgets an die relevanten Subsysteme abgeleitet werden. Über die Projektlaufzeit ab Q3/2018 wurden die Subsysteme auf diese Zielwerte optimiert. Nach Aufbau und Inbetriebnahme der Pilotanlage konnte die Ursache der gemessenen Latenzen zunächst nicht aufgeklärt werden (rote Pfeile Abb. 5). Erst nach der Umsetzung von Analyse-Algorithmen und Visualisierungstools konnten die Latenzen entlang des Signalpfades im Gesamtsystem vollständig zugeordnet werden.

Der ursprünglich angestrebte Zielwert der Gesamtsystemlatenz von 200ms konnte nicht ganz erreicht werden. Die an der Pilotanlage gemessenen Werte lagen auch in der letzten Projektphase im Durchschnitt etwa 10% über diesem Zielwert.

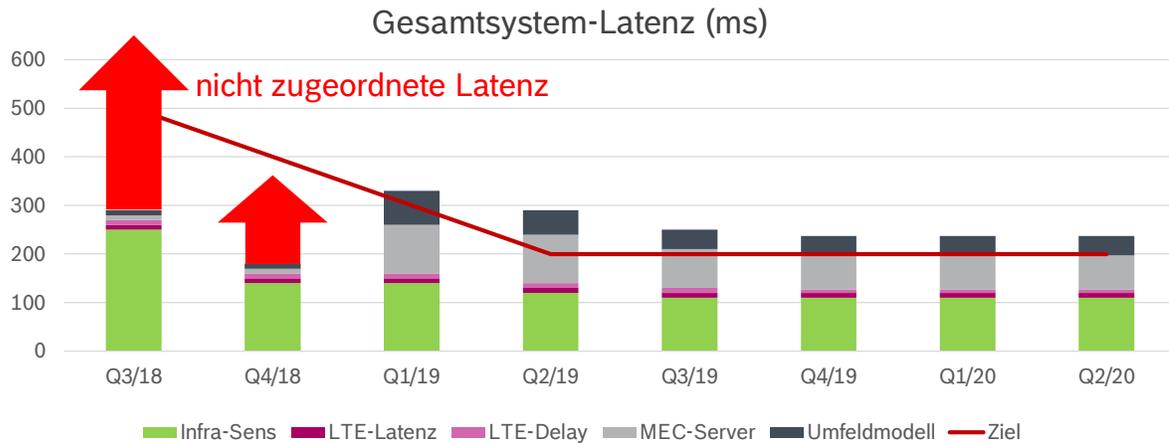


Abb. 5: KPI des Gesamtsystems ist die Gesamtsystem-Latenz. Darstellung in ms über Projektlaufzeit ab Q3/2018.

Entsprechende Darstellungen der KPIs für die MEC-View Subsysteme wurden in den Arbeitspaketen zwei bis sechs erarbeitet. BOSCH verfolgte die KPIs des AP1 und des AP6 in der Rolle des AP-Leiters.

6.1.3 UAP1.3 Pilotanlage Ulm

Unter der Leitung des Partners UULM wurden die übergeordneten Arbeiten an der im Projekt geplanten und aufgebauten Pilotanlage im Rahmen dieses Arbeitspakets durchgeführt. Zunächst wurde auf Basis des definierten Use Cases und den daraus abgeleiteten Anforderungen (vgl. UAP 1.1 Requirements Engineering in Abschnitt 6.1.1) in einem automatisierten Verfahren auf Basis von Kartendaten ca. 140 potenziell geeignete Kreuzungen identifiziert. Nach Überprüfung weiterer Randbedingungen, die nicht automatisiert auf Kartendaten geprüft werden konnten, wurde die Auswahl auf vier potenzielle Kreuzungen für die Pilotanlage reduziert. Schließlich konnte das Konsortium die Kreuzung in Ulm-Lehr (Abb. 6) als am besten geeignet zur Demonstration des MEC-View Use Cases identifizieren und auswählen. Verantwortliche Stellen der Stadt Ulm, die als assoziierter Partner in das Projekt eingebunden war, wurden von UULM in das Vorhaben einbezogen und haben das Projekt MEC-View entsprechend unterstützt, beispielsweise durch die entsprechenden Genehmigungen zum Anbringen der Sensorik und zum Aufbau von Behelfsmasten sowie die Energieversorgung der Anlage.

Nach der Entscheidung über die Lage der Pilotanlage in Ulm-Lehr wurde die Bevölkerung mittels Einwurf von Informationsschreiben sowie über das lokale Mitteilungsblatt und die Presse über die Aktivitäten des Projektes an der Kreuzung informiert, bevor erste Installationen der Infrastruktur-Sensoren und Referenz-Sensoren begonnen wurden. Zudem haben die betroffenen Partner ein Datenschutzkonzept ausgearbeitet. Passanten wurden zudem durch Hinweise und Informationen auf den Anlagenteilen über das Projekt informiert und für weitere Informationen auf die Webseite des Projekts verwiesen.

Die Installation an der Kreuzung vor Ort umfasst zum einen Kamera- und LiDAR-Sensoren, die im Rahmen des AP4 entwickelt, an Leuchtenmasten installiert und betrieben wurden. Zusätzlich wurde für Referenzmessungen ein zweites System mit Stereo-Kameras und Laserscannern an Behelfsmasten an der Kreuzung ebenfalls im Rahmen des AP 4 aufgebaut und betrieben. In beiden Fällen sind aufgrund des prototypischen Aufbaus die Recheneinheiten in zusätzlichen Gehäusen bzw. Schaltschränken untergebracht. Details zu beiden Systemen sind in den Berichten der Partner OSRAM und UULM zu finden. Die Vernetzung der Sensorik mit dem MEC-Server (AP3) sowie mit den automatisierten Fahrzeugen (AP6) erfolgt über das im Kapitel zu AP3 im Detail beschriebene Test-Mobilfunknetz. Die Verfahren zur Berechnung und Prädiktion des Umfeldmodells auf dem MEC-Server auf Basis der Sensordaten erfolgte im AP5.

Schlussbericht - Robert Bosch GmbH

Aufgrund der erfolgreichen Arbeiten in MEC-View wurde diese Installation in Ulm-Lehr nicht zum Projektende abgebaut, sondern von der Universität Ulm für weitere Forschungsvorhaben übernommen. Sie wird in Forschungsprojekten (z.B. dem von der EU geförderten Projekt ICT4CART oder dem vom BMWi geförderten Projekt LUKAS) eingebracht und dort gemeinsam mit Partnern aus Wirtschaft und Wissenschaft weiter genutzt.



Abb. 6: MEC-View Pilotanlage an der Kreuzung in Ulm-Lehr

6.1.4 UAP1.4 Projektmanagement, Dokumentation und Ergebnisverbreitung

BOSCH koordinierte die Aktivitäten des MEC-View Partnerkonsortiums. Die im Rahmen des Projektes gewonnen Erkenntnisse wurden gemäß den Förderrichtlinien in regelmäßigen Zwischenberichten und den Abschlussberichten dokumentiert. Die im Rahmen des Projektes entstandenen wissenschaftlichen Veröffentlichungen von BOSCH sind im Anhang zusammengefasst.

6.2 AP2 Digitale Karte, Dynamische Streckenfreigabe und Verhaltensanalyse

Die statische Karte für die APs 4, 5 und 6 konnte von TOMTOM nicht nach vereinbarten Anforderungen bereitgestellt werden. Nach Vereinbarung mit TOMTOM hat BOSCH die notwendigen Anpassungen der statischen, digitalen Karte für die Pilotanlage Ulm/Lehr erstellt. Der zugehörige Projekt-Meilenstein IQG2.1.1 konnte damit nach einer Verzögerung um drei Quartale abgeschlossen werden.

Die statische Karte (HD-Map) wurde zur Geolokalisierung von Messdaten und relevanten Objekten von verschiedenen Partnern in verschiedenen Subsystemen eingesetzt.

6.3 AP4 Infrastruktur-Sensorik

Das AP 4 wurde von OSRAM geleitet. BOSCH beschaffte für das Referenz-Messsystem in UAP 4.6 die Kamera-Hardware und beteiligte sich an der Konzeption des Referenz-Messsystems. Allerdings wurden nach einer technischen Analyse nicht die ursprünglich geplanten Kamera-Systeme von Bosch Building Technologies eingesetzt, sondern es kamen Kameras der Firma FLIR Integrated Imaging Solutions mit für den MEC-View Anwendungsfall angepassten Optik-Modulen der Firma Edmund Optics zum Einsatz.

6.3.1 UAP4.6 Referenzmesssystem

Zur Konzeption des Referenz-Messsystems wurden in verschiedenen Abstimmungsrunden mit UULM und dem Zulieferer BOSCH Sicherheitstechnik die Anforderungen an die Video-Sensoren diskutiert. Um auf

Schlussbericht - Robert Bosch GmbH

Mono-Video basierte Klassifikatoren verzichten zu können, die aufwändig mit hochauflösenden Bild-Daten trainiert werden müssten, wurde ein Konzept bestehend aus je zwei Stereo-Video Kameras an zwei Behelfsmasten im Bereich der Kreuzung in Ulm-Lehr bevorzugt.

Zur Synchronisation der Bilddaten eines Stereo Video Systems müssen die einzelnen Kameras extern triggerbar sein. Diese notwendige Voraussetzung konnte von den Kameras, die von Bosch Building Technologies angeboten wurden, nicht erfüllt werden. Es wurden daher von BOSCH alternative Kameras von der Fa. FLIR mit passenden Optikmodulen von Edmund Optics beschafft. Zwei der oben beschriebenen Kameras und Optiken wurden in 2017 beschafft und zu Testzwecken (Eignung als Referenz-Sensorsystem) an den Partner UULM weitergegeben.

6.3.2 Koordination / Unterstützung zur Qualitätsverbesserung der Infrastrukturobjekte

Um den in MEC-View definierten Use Case des Auffädels auf die vorfahrtsberechtigte Straße darstellen zu können, ist eine ausreichende Qualität der Infrastrukturobjekte nötig. Da diese im Projektverlauf zum definierten Zeitpunkt zur Projekthälfte noch nicht ausreichend war, wurde von BOSCH eine zweiwöchige MEC-Daten Regelrunde aufgesetzt. Ziel war es, fortlaufend die Qualität der MEC-Daten zu verbessern.

Im Rahmen dieser Runde wurde diskutiert, wie eventuelle Anteile, die ursprünglich infrastrukturensensorseitig geplant waren, doch auf die MEC-Server-seitige Fusion ausgelagert werden können, um einen Fortschritt im Projekt zu erreichen.

Um die tatsächliche Qualität der Daten feststellen zu können, wurde von BOSCH in regelmäßigen Abständen bzw. nach Änderungen an den Software-Ständen der Infrastrukturensensoren oder der MEC-Server Fusion Daten in Ulm aufgenommen, ausgewertet und entsprechende Mängel oder Verbesserungen in der nächsten Regelrunde besprochen. Um die Verbesserung der Daten voranzutreiben, wurde in Zusammenarbeit mit der UULM ein Auswertetool erstellt, verbessert und an OSRAM und Spies zur Auswertung deren Daten weitergeleitet. BOSCH hat bei Bedarf auch aktiv bei der Auswertung der Infrastruktur-Objektdaten unterstützt, bzw. diese zur Entlastung der Projektpartner selbst durchgeführt.

6.4 AP6 Automatisiertes Fahrzeug

Die inhaltlichen Arbeitsschwerpunkte von Bosch lagen in AP6, welches sich in 6 UAPs gliedert:

- UAP6.1 Fahrzeugintegration
- UAP6.2 Digitale Karte und Lokalisierung
- UAP6.3 Perzeption und Umfeld-Modellierung
- UAP6.4 Verhaltensplanung
- UAP6.5 Prädiktion dynamischer Objekte
- UAP6.6 Trajektorienplanung und Bewegungsregelung

Im Folgenden werden neben den Ergebnissen der einzelnen UAPs auch einige zusätzlich geleistete, sowie UAP übergreifende allgemeine Arbeiten, vorgestellt. In Abschnitt 6.4.1 werden alle geleisteten Anteile bezüglich der Fahrzeugintegration beschrieben. Hierzu gehören beispielsweise die verbauten Sensoren und Kommunikationsmodule. Abschnitt 6.4.2 stellt alle Anteile bezüglich der digitalen Karte und der Ego-Lokalisierung auf Basis von MEC-Daten vor. Die geleisteten Arbeiten bezüglich der Perzeption und Umfeld-Modellierung werden in Abschnitt 6.4.3 zusammengefasst. Insbesondere wird detailliert auf die Themen On-board Sensor Fusion, Verarbeitung der MEC-Daten, Erstellung teilsimulierter Szenen und anschließender T2T-Auswertung mit teilsimulierten Szenen eingegangen. In Abschnitt 6.4.4 werden die Arbeiten zur Verhaltensplanung dargestellt. Dabei wird detailliert auf die Themen Schnittstellen in der Verhaltensplanung, den Planungsalgorithmus – „Behavior Search“, Fahren unter eingeschränkter Sicht, Erweiterung der Sichtbarkeit durch die Infrastruktur, Synchronisiertes Auffädeln auf die Vorfahrtsstraße, eine simulative Analyse des Synchronisierten Auffädels und schließlich der KPI Analyse eingegangen. Die Arbeiten zur Prädiktion dynamischer Objekte, mit den Schwerpunktthemen Hierarchische Prädiktion, Deep Learning basierte Intentionsprädiktion, Blinkerererkennung und Pfädprädiktion, wurden in Abschnitt 6.4.5 zusammengefasst. Die Trajektorienplanung und Bewegungsregelung ist in Abschnitt 6.4.6 dargestellt. Insbesondere wird detailliert auf die entwickelten Trajektorien eingegangen, die synchronisiertes Auffädeln auf die Vorfahrtsstraße ermöglichen.

Schlussbericht - Robert Bosch GmbH

In Abschnitt 6.4.7 werden alle Arbeiten zur Simulation, die als Basis zur Entwicklung der Verhaltens- und Trajektorienplanung verwendet wurde, vorgestellt. Abschließend präsentiert Abschnitt 6.4.8 die zusätzlich geleisteten Anteile zur Vertrauensbildung durch Augmented Reality dargestellt.

6.4.1 UAP6.1 Fahrzeugintegration

Ein vorhandener Versuchsträger wurde für die Verwendung in MEC-View vorbereitet. Die im Fahrzeug verbauten Module, wie Rechnermodule, das Datennetzwerk und das Middleware System wurden überprüft und für die Belange von MEC-View angepasst. Abb. 7 zeigt den fertig aufgebauten Versuchsträger.



Abb. 7: Automatisiertes Fahrzeug – Versuchsträger von BOSCH

Der Versuchsträger verfügt über eine Basis Software-Architektur mit automatischer Quer- und Längsführung zum automatisierten Fahren. Das für die Belange von MEC-View ausgewählte Sensorset besteht aus einem auf dem Dach montierten LiDAR-Sensor, einer hinter der Windschutzscheibe angebrachten Stereovideokamera und fünf Midrange-Radarsensoren, jeweils einer an der Fahrzeugfront und an den Fahrzeugecken, siehe Tab. 1. Die Sensoren sind im Fahrzeug integriert.

Tab. 1: In das automatisierte Fahrzeug integrierte Umfeld-Erfassungssensoren

Sensor	Reichweite	Öffnungswinkel
Velodyne LiDAR 64	60m	360°
5 x Bosch Mid-Range Radarsensor	70m	110°
Bosch Stereo-Videokamera	50m	45°

Im ersten Berichtszeitraum Q1/Q2 des Projektes wurden die Basis-Funktionalitäten des Fahrzeugs für das automatisierte Fahren in urbanen Verkehrsräumen in Betrieb genommen.

Schlussbericht - Robert Bosch GmbH

Im Folgenden konnten erste Versuchsfahrten mit dem automatisierten Fahrzeug an der Pilotanlage in Ulm durchgeführt werden, allerdings noch ohne Anbindung an den MEC-Server. Voraussetzung für die Kommunikation mit dem MEC-Server ist die Integration des Fahrzeug-Kommunikationsmoduls (CCU) von RBCM (Abb. 8).

Die CCU-HW inklusive konfektionierter Verkabelung wurde BOSCH bereits in Q4 zur Verfügung gestellt und im Fahrzeug verbaut. Im folgenden Quartal Q5 wurde das Gerät in Betrieb genommen.



Abb. 8: RBCM CCU

Für die Inbetriebnahme der Kommunikation mit dem MEC-Server wurde die CCU programmiert und konfiguriert. Dadurch konnten mit der CCU gemäß der Schnittstellenspezifikation (API.1) Objekt-Daten vom MEC-Server über das prototypische 5G Netzwerk von Nokia Daten zur Weiterverarbeitung im Fahrzeug-Rechner empfangen werden. Erste Objektdaten von den Infrastruktursensoren an der Pilotanlage konnten auf der visualisierten digitalen Karte im Fahrzeugrechner mit dem Visualisierungstool RVIZ dargestellt werden.

Damit war das Arbeitspaket UAP6.1 abgeschlossen. Das BOSCH-Fahrzeug zur Darstellung der automatisierten Fahrfunktionen ist aufgebaut und betriebsbereit.

Die RBCM-CCU ist integriert und funktional. Die Kommunikation über das prototypische 5G-Netzwerk von Nokia mit dem MEC-Server ist mit der Zielperformance (Latenz, Verfügbarkeit, Datenrate) erreicht.

Zur Performancesteigerung wurde das BOSCH-Fahrzeug zusätzlich zu den MEC-View Inhalten mit neuen BOSCH Radar-Sensoren ausgerüstet. Dabei handelt es sich um die Nachfolgeneration der bisher genutzten Sensoren. Im Vergleich zur Vorgängergeneration verfügt diese über eine höhere Auflösung und kann dadurch mehr Objekte über eine größere Distanz erkennen und verfolgen. Die neuen Sensoren wurden im Fahrzeug verbaut, mit den nötigen Schnittstellen verbunden und kalibriert. Sie sind somit ebenfalls betriebsbereit.

6.4.2 UAP6.2 Digitale Karte und Lokalisierung

Dieses Unterarbeitspaket beschäftigt sich zum einen mit der Erstellung bzw. Aufbereitung der hochgenauen Digitalen Karte für hochautomatisierte Testfahrten, sowie zum anderen mit einer Infrastruktur-basierten experimentellen Lokalisierung.

Die Kartierung des Testfeldes mit einer prototypischen Implementierung eines Vorschlages für ein Kartenformat ist im Testgelände in Ulm-Lehr durch BOSCH erfolgt. Parallel zur Kartierung in Ulm-Lehr wurde die Teststrecke in Renningen kartiert. Abb. 9 zeigt einen Ausschnitt aus der erstellten Karte im Testgebiet Ulm-Lehr.

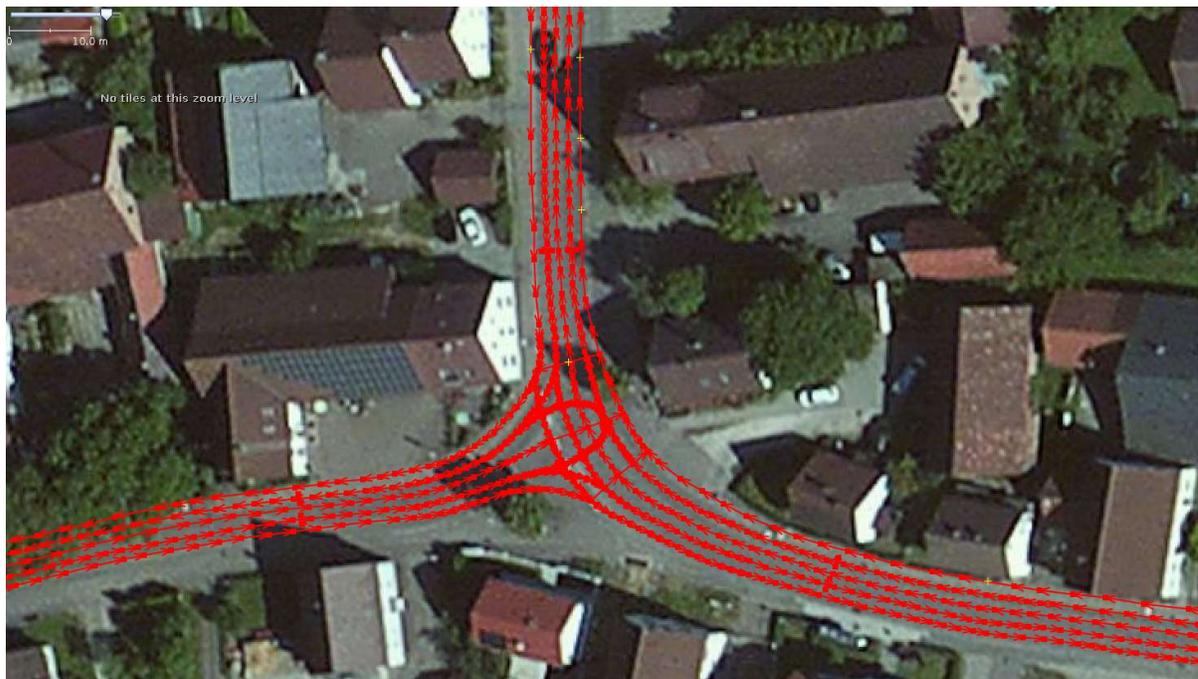


Abb. 9: Aufgenommener Kartenausschnitt im Testareal in Ulm-Lehr

Ziel der Kartierung war das experimentelle Finden von Anforderungen durch Vorabtests mit Prototypen. Auf Basis der Erfahrungen aus diesem ersten Feldtest wurde die Diskussion mit den Partnern über die Anforderungen für digitale Karten für den MEC-View-Use-Case gestartet. In der Diskussion zeigte sich, dass die experimentell gefundenen Anforderungen zielführend sind. Von den Partnern wurden die Anforderungen geteilt und ergänzt.

Analog zum Vorgehen bei der Anforderungsanalyse für die digitale Karte wurde auch bei der Lokalisierung auf einen experimentellen Ansatz zur Analyse der Anforderungen gesetzt. Um auch für die Lokalisierung einen Prototyp zur Anforderungsanalyse und als Basis für die weitere Entwicklung zu haben, wurde daher prototypisch ein Lokalisierungsverfahren auf Basis von Differential-GPS in Verbindung mit einer Inertialeinheit entwickelt.

Dieses konnte sowohl auf der Teststrecke in Renningen als auch im Testareal in Ulm-Lehr erfolgreich in Betrieb genommen und getestet werden. Erste Ergebnisse zeigten gute Performance; die vorliegende Implementierung bildet für weitere Experimente folglich eine gute Ausgangsbasis.

Erstellung der hochgenauen Digitalen Karte

Die erste Version der in AP2 erstellten digitalen Karte von TOMTOM (siehe Abschnitt 6.2) wurde prototypisch im Fahrzeug eingebunden und zur Verfeinerung der Kartenanforderungsliste in experimentellen Fahrversuchen evaluiert.

Auf Basis der Erfahrungen im experimentellen Umgang mit der prototypischen Kartierung des Testgeländes in Ulm-Lehr wurde zusammen in Diskussion mit der Universität Ulm die Anforderungsliste für die digitale Karte im Projekt MEC-View um zusätzlich notwendige Kartenelemente erweitert, konkretisiert und priorisiert. Diese wurde zur Erstellung der finalen Version der digitalen Karte an die Projektpartner aus AP2 übergeben.

Schlussbericht - Robert Bosch GmbH

Besonderen Wert wurde daraufgelegt, dass die Karte konsistente Fahrbahnabschnitte mit ihren jeweiligen physischen und virtuellen Begrenzungen beinhaltet, um einen exakt definierten fahrbaren Bereich als Grundlage für die Bewegungsfreiheiten des Fahrzeuges zu haben. Des Weiteren sollten alle notwendigen Verkehrsregeln in der Karte enthalten sein.

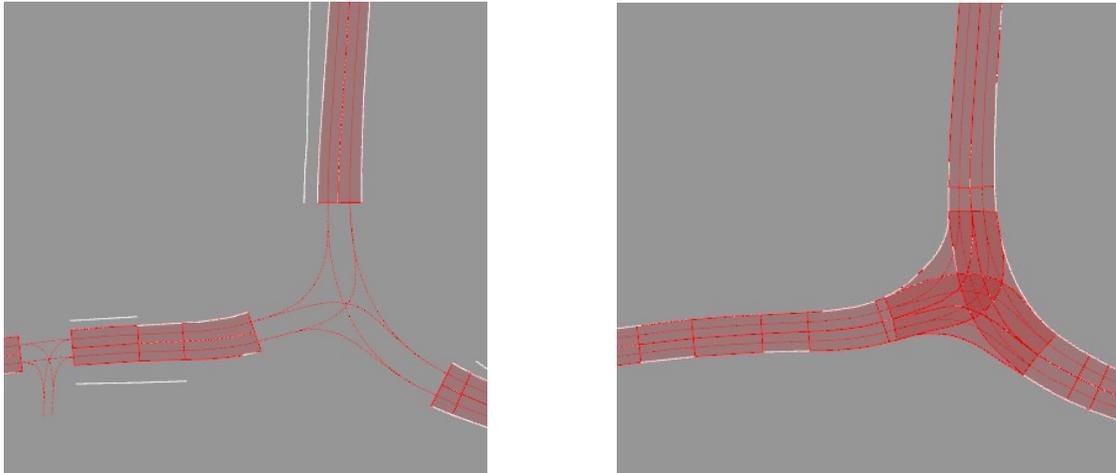


Abb. 10: Erste Version der digitalen Karte (links) und deren manuelle Anpassungen im Kreuzungsbereich (rechts)

Wie beschrieben, wurde mit den Projektpartnern eine Anforderungsliste für die finale Version der digitalen Karte erstellt. Diese wurde vom AP2 im Projekt nicht mehr zur Verfügung gestellt. Da die Karte einen wesentlichen Beitrag zum Projekterfolg hat, wurde auf BOSCH Seite die Karte manuell so angepasst, dass sie der Anforderungsliste entspricht. Dieser Prozess ist exemplarisch in Abb. 10 dargestellt. Die resultierende Gesamtkarte im Bereich Ulm-Lehr ist in Abb. 11 visualisiert. Die Karte wurde in ihrer Gesamtheit vervollständigt, um die Demonstrationsanforderung, einer unterbrechungsfreien automatisierten Rundfahrt, erfüllen zu können. Abb. 12 zeigt beispielhaft drei von uns zu diesem Zweck vervollständigte Kreuzungsbereiche.



Abb. 11: Angepasste digitale Karte der Testkreuzung und Umgebung im Stadtteil Ulm Lehr.



Abb. 12: Detaillierte Ansicht von drei angepassten Kreuzungen im Stadtgebiet Ulm Lehr.

Die final angepasste Karte wurde in unser System einbezogen und konnte erfolgreich in der Simulation getestet werden.

Lokalisierung

Die Bestimmung der eigenen Pose in einem globalen Koordinatensystem mit Hilfe des MEC-Servers wurde untersucht und in [Digel2020] veröffentlicht. Die Lokalisierung mit Hilfe von Infrastruktursensorik kann insbesondere die Zuverlässigkeit erhöhen, da diese nicht von einem globalen Navigationssatellitensystem (GNSS) abhängig ist. Der Grund dafür ist, dass in urbanen Gebieten GNSS durch Mehrwegeausbreitungen und Canyoning große Probleme bei der Zuverlässigkeit und der Genauigkeit aufweisen. Eine exemplarische Szene, bei der die Lokalisierung mit Hilfe der Infrastruktursensorik durchgeführt werden kann, ist in Abb. 13 dargestellt. Der MEC-Server stellt dem Ego-Fahrzeug die getrackten Posen der Verkehrsteilnehmer und des Ego-Fahrzeugs im globalen MEC-Koordinatensystem zur Verfügung. Das Ego-Fahrzeug trackt die Verkehrsteilnehmer im lokalen Fahrzeugkoordinatensystem. Zur Lokalisierung werden die Posen eines Verkehrsteilnehmers in beiden Koordinatensystemen kombiniert, um auf die Pose des Ego-Fahrzeugs im globalen Koordinatensystem rückschließen zu können. Die Systemarchitektur ist exemplarisch in Abb. 14 dargestellt.

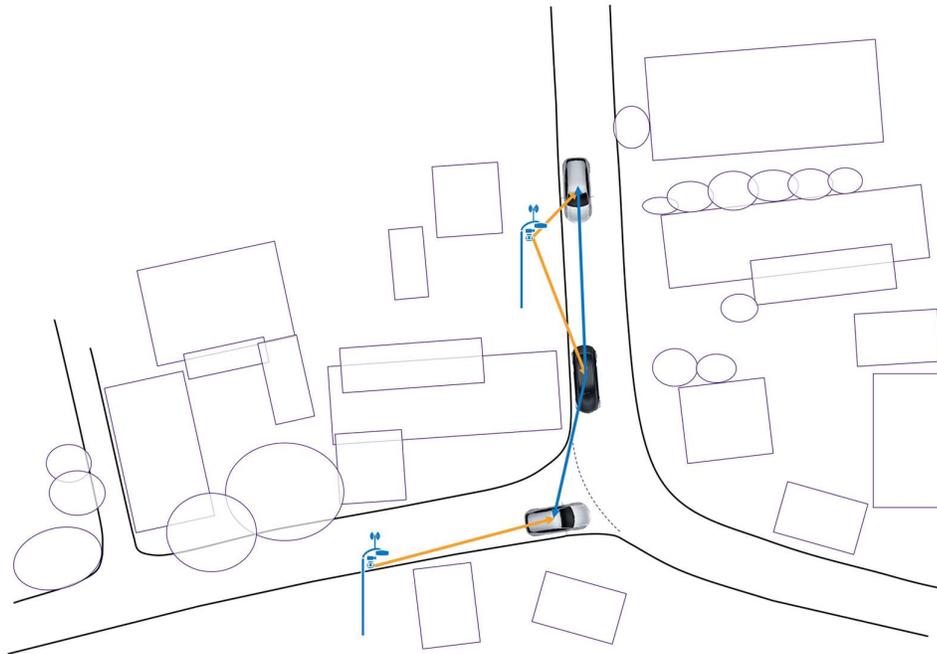


Abb. 13: Schematische Darstellung der Lokalisierung mit Hilfe von Infrastruktursensorik. Der MEC-Server stellt dem Ego-Fahrzeug die getrackten Posen der Verkehrsteilnehmer und des Ego-Fahrzeugs im globalen MEC-Koordinatensystem (gelb) zur Verfügung. Das Ego-Fahrzeug trackt die Verkehrsteilnehmer im lokalen Fahrzeugkoordinatensystem (blau).

Aus jedem korrekt zugeordneten Paar von Posenschätzungen desselben Verkehrsteilnehmers, im Ego- und globalen Koordinatensystem, kann durch Transformation auf die globale Pose des Ego Fahrzeugs geschlossen werden. Dabei wird die globale Pose des Verkehrsteilnehmers entlang der lokalen Messung rotiert und verschoben. Die Orientierung (Azimuth) des Ego Fahrzeugs ist dabei eine Voraussetzung zur Bestimmung der Position. Um den Einfluss des Orientierungsfehlers auf die Position zu minimieren, wird zuerst aus allen Paaren mittels Fusion die bestmögliche Schätzung der Orientierung erreicht. Anschließend wird basierend auf dieser optimierten Orientierung die Position aus den Paaren bestimmt und diese Informationen wieder fusioniert. Das Ergebnis wird mit Hilfe eines Kalman Filters getrackt, so werden auch die inertialen Messungen des Ego Fahrzeugs berücksichtigt.

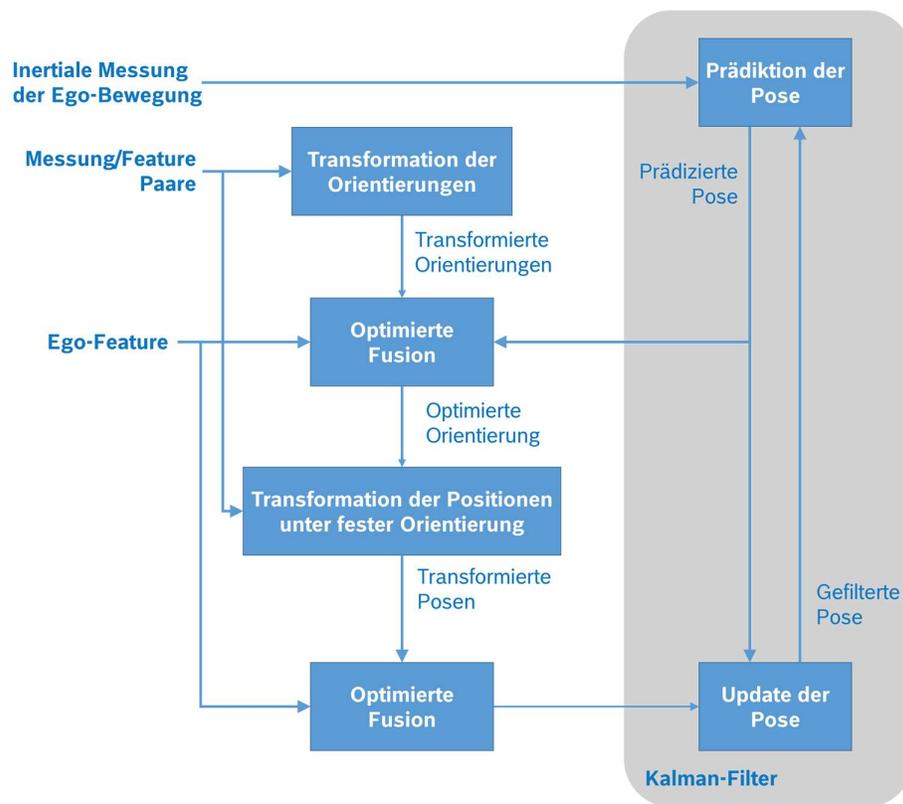


Abb. 14: Schematische Darstellung des Algorithmus zur Ego-Lokalisierung auf Basis von MEC-Daten. Aus [Digel2020]

Zur Berücksichtigung von Kreuzkovarianzen wird zur Fusion der Covariance-Intersection-Algorithmus angewandt, da keine Informationen über die Tracking-Algorithmen im Fahrzeug und Infrastruktur vorliegen. Diese ermöglicht eine stabile obere Abschätzung der resultierenden Kovarianz.

Zur Bewertung des Gesamtsystems wurden verschiedene simulierte Szenarien getestet. Die Trajektorien der Verkehrsteilnehmer und des Ego-Fahrzeugs wurden aufgrund der hochgenauen Karte erstellt. Mit Hilfe eines Simulationstools wurden realitätsnahe Beschleunigungen und Abstände erzeugt. Die Ground-Truth-Trajektorien wurden verrauscht, im Falle der Infrastruktur stärker als für das Fahrzeug, da die Infrastruktur auf günstigere Sensoren setzt. Die Verkehrsteilnehmer wurden anschließend jeweils im Fahrzeug- und Globalkoordinatensystem getrackt. Die erstellten Tracks wurden dem Algorithmus übergeben. In Abb. 15 ist ein Ergebnis exemplarisch abgebildet. Zudem wurden reale Szenen mit Aufnahmen durch die nicht finale Infrastruktursensorik erstellt. Die entwickelte Methode liefert ein konsistentes Lokalisierungsergebnis trotz geringer Informationen über den Aufbau der Infrastruktur. Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass der Lokalisierungsalgorithmus, unter den erwarteten Messungenauigkeiten der Infrastruktur und des Fahrzeugs, eine höhere Genauigkeit als GPS aufweist.

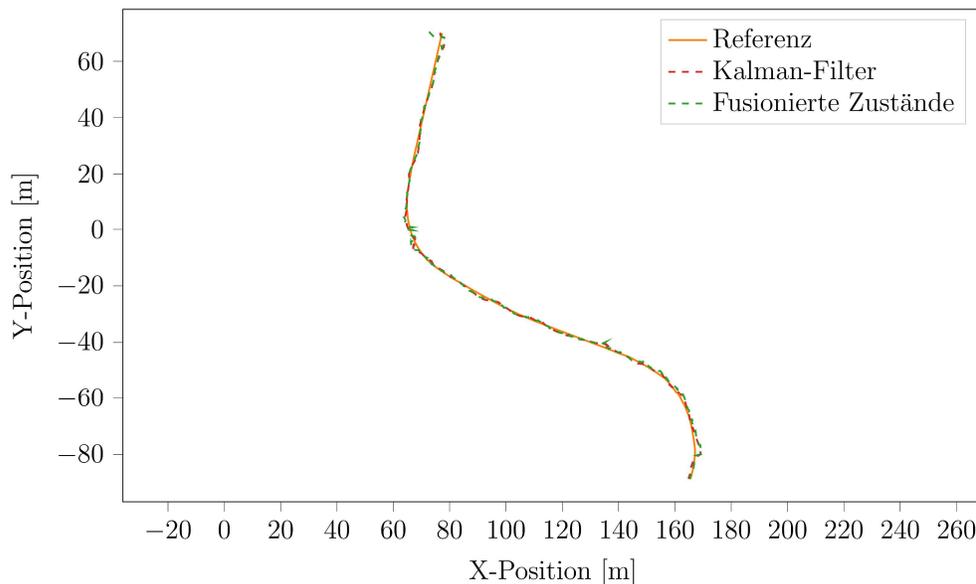


Abb. 15: Exemplarisches Ergebnis der Infrastruktur-basierten Lokalisierung

Zum Abschluss der Arbeit wurde ein Test mit Realdaten durchgeführt. Dabei wurde zur Erzeugung der Ground Truth ein hochgenaues Lokalisierungssystem, bestehend aus DGPS und IMU, verwendet. Die Anzahl der beobachtbaren Verkehrsteilnehmer schwankte dabei bis zu maximal drei weiteren Verkehrsteilnehmer. Die Ergebnisse sind in Abb. 16, die numerischen Ergebnisse darunter in Tab. 2 dargestellt.

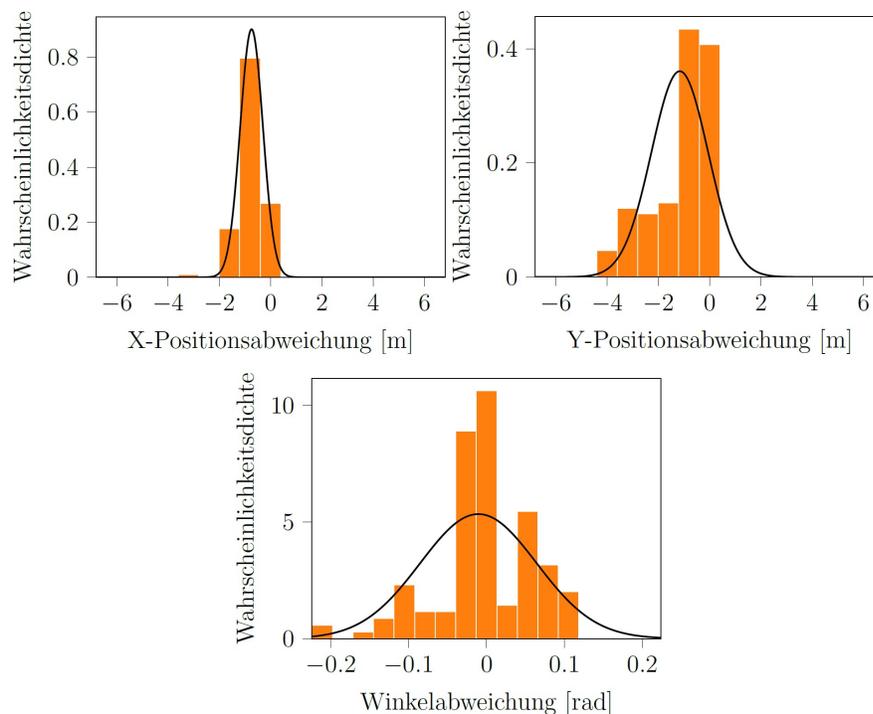


Abb. 16: Abweichungen der Lokalisierung mit Realdaten. Histogramm der Abweichung. Schwarz: Angepasste Normalverteilung. Die Werte der angepassten Normalverteilung sind in **Tab. 2** dargestellt

Tab. 2: Abweichung der Lokalisierung mit Realdaten.

	X-Positionsabweichung	Y-Positionsabweichung	Winkelabweichung
Mittelwert	-0.74m	-1.16m	-0.50°
Std.-Abweichung	0.44m	1.10m	4.28°

6.4.3 UAP6.3 Perzeption und Umfeld-Modellierung

Im Zuge der Anforderungsanalyse und der Abstimmung der Schnittstelle zwischen MEC-Server und den Fahrzeugen hat sich gezeigt, dass eine Datenübertragung des Umgebungsmodells auf Objektebene einen guten Kompromiss zwischen Datenumfang und Genauigkeit des Umgebungsmodells darstellt, weshalb der MEC-Server die Daten auf dieser Abstraktionsebene überträgt. Das für die Übertragung der Daten zugrundeliegende Objektmodell ist eine Box, welche sich gut als Beschreibung der übertragenen Objekte eignet. Als Zustandsgrößen der Objekte wurde die Position, Geschwindigkeit sowie die Ausdehnung der Objekte als für die Darstellung des Use-Cases notwendigen Größen identifiziert. Die Ungenauigkeit des Gesamtzustandes wird, unter der Annahme einer Normalverteilung, mittels einer Kovarianzmatrix übergeben.

Basierend auf der erfolgreichen Abstimmung der Schnittstelle wurde das Systemdesign der Objektperzeption in den Fahrzeugen fertiggestellt. Angestrebt wurde eine heterogene Fusion aus zeitlich unkorrelierten Messgrößen der Onboard-Sensorik sowie den bereits im MEC-Server getrackten Objekten. Abb. 17 zeigt den geplanten Systemaufbau.

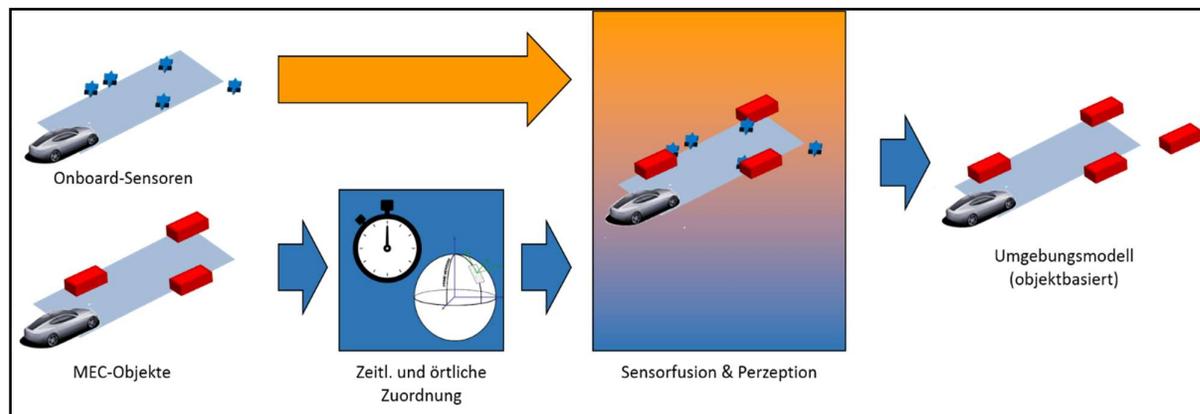


Abb. 17: Systemaufbau der Perzeption im AP6.3

Onboard Sensor Fusion

Für die Sensordatenverarbeitung auf Fahrzeugebene wurde ein modulares Perzeptionssystem integriert. Die Informationen werden auf Feature-Ebene verarbeitet, da hier keine relevante Bandbreitenbeschränkung vorliegt. Dabei werden Lidar-, Radar- und Kamerasensoren verwendet. Zusätzlich steht ein inertiales Messsystem zur Verfügung, dessen gelieferte Daten zur Bewegungskompensation und Lokalisierung verwendet werden. Nach einer sensorspezifischen Vorverarbeitung werden die Features mittels Extended Kalman-Filter fusioniert. Dafür wurden verschiedene Bewegungsmodelle prototypisch integriert.

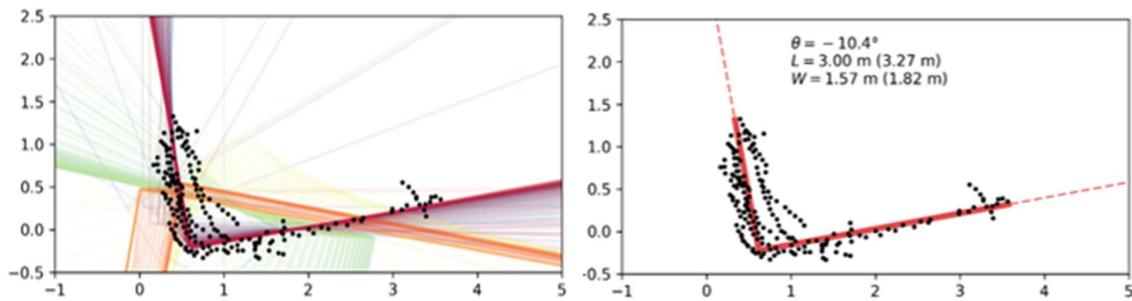


Abb. 18: Vorabuntersuchungen zum robusten und genauen Fitting von Boxen in Sensordaten. Links: Objekthypothesen. Rechts: Finales Ergebnis.

Ein genauer untersuchter Aspekt ist die Erfassung der Ausrichtung anderer Verkehrsteilnehmer mittels Lidar. Im anfänglich genutzten Perzeptionssystem wurde der Ausrichtungswinkel der Bounding-Boxen mit der Annahme einer Normalverteilung modelliert. Dies widerspricht der Periodizität eines Winkels und kann zu Problemen bei der Berechnung von Winkeldifferenzen führen. Als Lösung wurde ein Zirkularschätzer entworfen und die Erkenntnisse in [Loshaj2019] veröffentlicht. Für die Messung werden L-Formen mit Hilfe eines Ransac-Algorithmus in die Lidar-Punktwolke gelegt, welche vorher auf eine Fläche projiziert wurde. Dadurch sollen Ecken von Fahrzeugen einschließlich ihrer Ausrichtung approximiert werden. Ein Beispiel ist in Abb. 18 dargestellt. Da ein Fahrzeug jedoch üblicher Weise vier Ecken bzw. Seiten hat, lässt sich so eine tatsächliche Orientierung nicht im kompletten Kreis bestimmen. Es kann keine Unterscheidung zwischen den Seiten und der Rück- bzw. Vorderseite gemacht werden. Damit lässt sich die Orientierung ausschließlich in einem Quadranten, also zwischen 0 und $\frac{\pi}{2}$, bestimmen. Um die Periodizität einzubeziehen wird eine Von-Mises-Verteilung, siehe Abb. 19, angewendet.

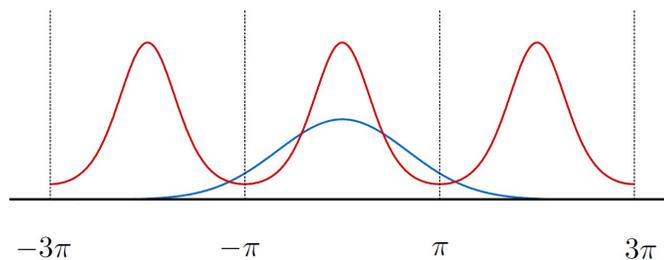


Abb. 19: Die Normalverteilung (blau) vernachlässigt die Periodizität, wohingegen die Von-Mises-Verteilung (rot) diese berücksichtigt. Damit eignet sich diese zur Modellierung von Winkelungenauigkeiten. Aus [Loshaj2019].

Um die Performance zu verbessern, wurde eine Nachbearbeitung entworfen, in welcher Messungen mit geringerer Genauigkeit aussortiert werden. Der zirkuläre Von-Mises-Tracker mit Nachbearbeitung wurde simulativ getestet und mit bestehenden Verfahren verglichen. Dabei schnitt der neu entwickelte Tracker besser ab als die bestehenden.

Zur Bewegungsmodellierung der getrackten Verkehrsteilnehmer wurden verschiedene Bewegungsmodelle prototypisch implementiert und getestet. Constant Velocity beruht auf der Annahme, dass sich die Geschwindigkeit zwischen den Messzeitpunkten nicht verändert. Bei Constant Acceleration hingegen liegt die Annahme zugrunde, dass die Beschleunigung konstant ist. Bei beiden Modellen wird von einer konstanten Drehrate ausgegangen. Bei praktischen Tests zeigte sich, dass das Constant-Velocity-Modell realistisches Fahrverhalten besser abbildet.

Schlussbericht - Robert Bosch GmbH

Die in UAP6.1, siehe Absatz 6.4.1, zusätzlich verbauten Radar-Sensoren wurden in die Perzeption integriert. Dafür wurde das vorhandene Perzeptionssystem um eine angepasste Radar-Signalverarbeitung erweitert. Um dessen Funktion zu überprüfen, wurden Testfahrten in verschiedenen Verkehrssituationen zur Datenaufzeichnung durchgeführt. In ersten qualitativen Untersuchungen zeigten sich bereits Verbesserungen gegenüber der vorherigen Radar-Generation. Es stehen deutlich mehr Messpunkte zur Verfügung, was im Nahbereich Clustering ermöglicht. Fahrzeuge werden auf größerer Entfernung erkannt und zudem ist der Sichtbereich der genutzten Radare größer.

Verarbeitung der MEC-Daten

Um die Daten der im Fahrzeug verbauten LiDAR-, Radar- und Kamerasensoren auf Feature-Ebene fusionieren und die Verkehrsteilnehmer tracken zu können, wurde für das MEC-View Projekt ein bestehendes Basis-Perzeptionssystem integriert. Damit die Informationen vom MEC-Server genutzt werden können, müssen diese in das Umfeldmodell des Fahrzeugs integriert werden. Im Folgenden wird auf das Perzeptionssystem eingegangen, im speziellen auf die Verarbeitungsschritte zur Integration der MEC-Daten: Retrodiktion, Transformation, Assoziation und Fusion. Die wesentlichen Komponenten sind in Abb. 20 dargestellt.

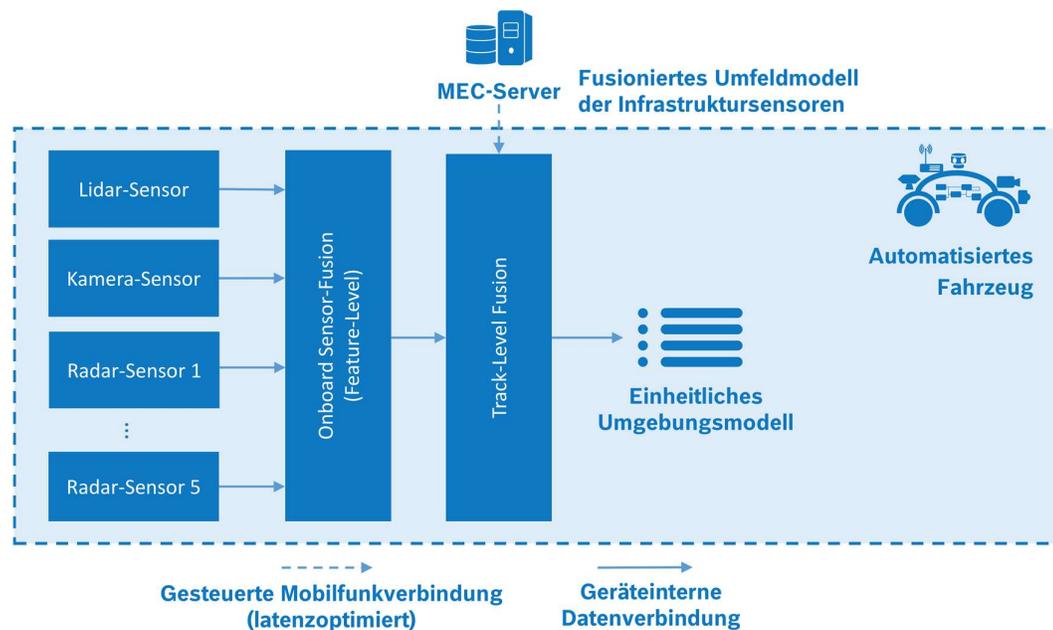


Abb. 20: Allgemeines Strukturbild der fahrzeugseitigen Fusion, bestehend aus der lokalen Fusion der am Fahrzeug verbauten Sensoren, gefolgt von einer nachgelagerten Track-To-Track Fusion mit dem Infrastruktur-Umfeldmodell [Gabb2019].

Vom Moment der Aufnahme in den Infrastruktursensoren, über die Fusion aller Infrastrukturdaten im MEC-Server bis zum Empfang des getrackten Objekts auf dem Fahrzeug vergeht eine gewisse Zeit, auch Latenz genannt. Diese setzt sich unter anderem aus der Verarbeitungsdauer auf dem MEC-Server und der Übertragungslaufzeit zusammen. Durch Edge-Computing werden die Auswirkungen zwar verringert, müssen aber dennoch berücksichtigt werden. So können Informationen aus dem MEC-Server das Fahrzeug erreichen, nachdem dort bereits aktuellere Informationen aus den Onboard-Sensoren verarbeitet wurden (vgl. Abb. 21).

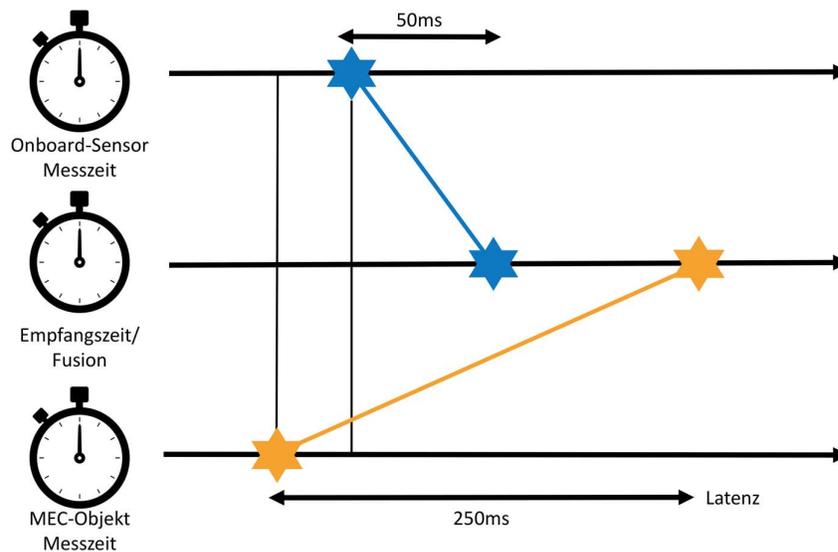


Abb. 21: Exemplarische Darstellung der Latenzproblematik

Um die Informationen in der korrekten Reihenfolge zu verarbeiten wird das Umgebungsmodell auf den Zeitpunkt der Aufnahme der MEC-Daten rückprozessiert. Dieses Vorgehen ist auch als Retrodiktion bekannt. Dafür wird jedes einzelne Update aus dem Objekttrack entfernt. Die Speicherung aller vergangener Messungen ist hierfür notwendig. Anschließend werden die MEC-Daten in das Umgebungsmodell fusioniert und die aktuelleren Updates wieder angewendet.

Um die Performance der Retrodiktion vergleichen zu können, wurde zusätzlich das weniger rechen- und speicherintensives Verfahren Forward-Prediction Fusion and De-correlation (FPFD) implementiert. Dabei wird ein repräsentatives Update berechnet, welches alle aktuelleren Informationen enthält und unabhängig vom letzten Zustand vor der Messung ist. Anschließend wird der letzte Zustand der Schätzung vor dem Zeitpunkt der Messung des MEC-Objektes mit den Daten des MEC-Servers aktualisiert. Der dabei gewonnene Zustand wird mit dem repräsentativen Update aktualisiert. In der Praxis ist FPFD zwar ressourcenschonender, die Rückprozessierung ist aber stabiler und liefert genauere Ergebnisse.

Für die Fusion in das Umgebungsmodell des Fahrzeugs müssen die im Infrastrukturkoordinatensystem getrackten MEC-Objekte in das Fahrzeugkoordinatensystem transformiert werden (vgl. Abb. 22). Um nichtlineare Einflüsse gering zu halten, werden MEC-Objekte auf einer ENU Tangentialebene des WGS84 Ellipsoids verortet. Durch die nötige Rotation ist die Transformation dennoch nichtlinear. Als Approximation wird hierfür die Unscented-Transformation angewendet, wobei mehrere Sigmoidpunkte, in Abb. 22 rot dargestellt, transformiert werden, um die Näherung zu verbessern.

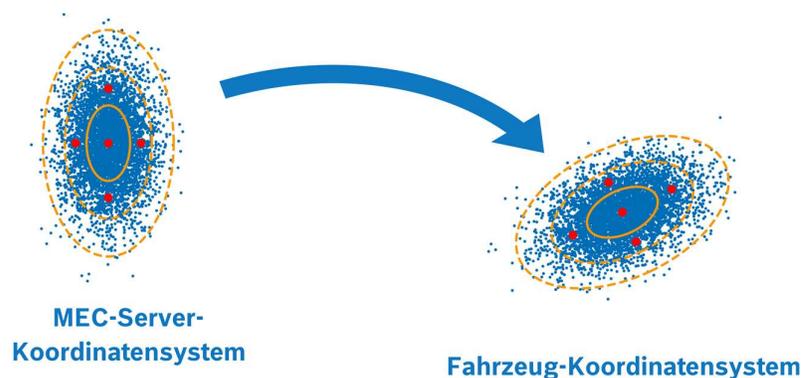


Abb. 22: Unscented-Transformation der Koordinatensysteme. In Rot die Sigmoidpunkte, in Orange die Standardabweichung.

Wird der Verkehrsteilnehmer nicht nur von der Infrastruktur, sondern auch vom Fahrzeug getrackt, muss das übertragene MEC-Objekt korrekt dem bestehenden Objekt im Fahrzeugumgebungsmodell zugeordnet werden. Die Folge einer inkorrekten Zuordnung können duplizierte Objekte oder falsch zugeordnete und damit verschobene Objekte sein. Ein MEC-Objekt wird mit allen bestehenden Objekten in einem dreistufigen Gatingverfahren abgeglichen. Um Rechenzeit zu sparen, werden in den ersten beiden Stufen der räumliche und der dynamische Abstand mit einem Grenzwert verglichen, ohne die Genauigkeit der Mittelwerte einzubeziehen. Der letzte Schritt besteht in der Berechnung der statistischen Distanz. Dabei wird die Ungenauigkeit in der Berechnung berücksichtigt, d.h. ungenaue Größen werden schwächer gewichtet. Der Grenzwert wird abhängig von der Anzahl der Größen und einem Erwartungsbereich gewählt. Der Algorithmus ist in Abb. 23 dargestellt.

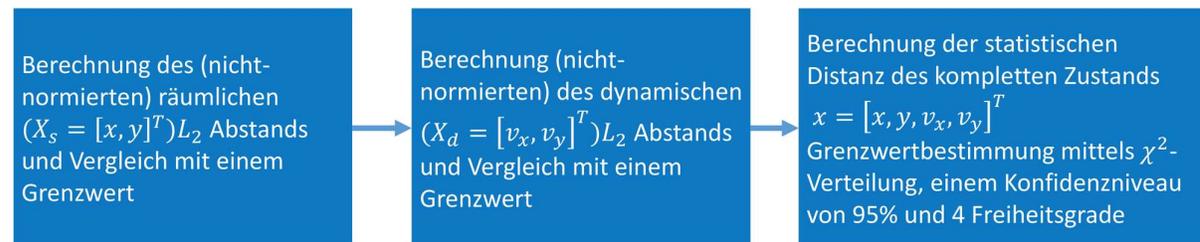


Abb. 23: Vereinfachtes Ablaufdiagramm für die Track-Level Daten-Assoziation

Wurde das MEC-Objekt zu einem bestehenden Objekt zugeordnet, werden diese fusioniert. Da sowohl das Objekt aus dem Fahrzeugumgebungsmodell als auch das MEC-Objekt getrackt wurden, können zwischen den Zuständen unbekannte Korrelationen auftreten, welche zu Kreuzkovarianzen führen. Der Ursprung dafür sind z.B. dieselben Annahmen bei der Bewegungsmodellierung im Fahrzeug und auf dem MEC-Server. So wird bei einer naiven Fusion der resultierende Fehler überschätzt, was im Folgenden zur Divergenz des Filters führen kann. Da aus Fahrzeugsicht keine Informationen über die angewendeten Algorithmen auf dem MEC-Server bekannt sind, wird hier *Covariance Intersection (CI)* angewendet. CI liefert eine konsistente und pessimistische Fusion, unabhängig von zusätzlichen Informationen neben dem Mittelwert und der Kovarianzmatrizen. Ein Beispiel ist in Abb. 24 dargestellt.

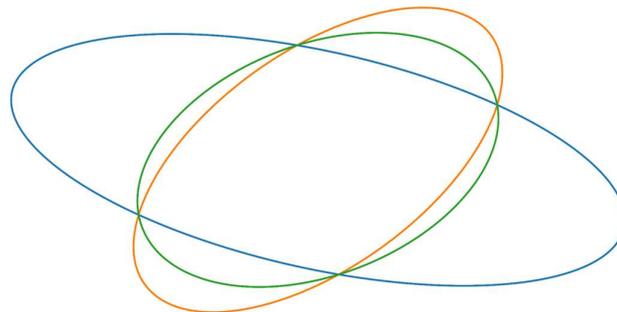


Abb. 24: Visualisierung unterschiedlicher Kovarianzellipsen eines Objektes. Blau und Gelb werden zu Grün fusioniert.

Erstellung teilsimulierter Szenen

Um das gesamte hybride Perceptionssystem aus Fahrzeugsensoren und Informationen aus der Infrastruktur unabhängig vom Status des MEC-Servers testen zu können, wurden teilsimulierte Szenen erstellt (vgl. Abb. 25), welche die Vorteile von sowohl realer als auch simulierter Datenauswertung beinhalten. Dafür wurden reale Szenen an der Kreuzung mit dem Fahrzeug aufgenommen. Um den erweiterten Sichtbereich der Infrastruktur zu simulieren, wird anhand der sichtbaren Bewegung eine Retrodiktion, basierend auf der im Projekt verfügbaren digitalen Karte, erstellt. Die daraus erzeugten Trajektorien kombiniert mit den aufgezeichneten Fahrten, werden als Ground Truth definiert. Mit Hilfe simulierter Sensoren wird diese Ground Truth künstlich

Schlussbericht - Robert Bosch GmbH

verrauscht, getrackt und in MEC-Servernachrichten übertragen, die dann mit einer simulierten Latenz verzögert werden. Durch das Hinzufügen dieser künstlichen Nachrichten in die ursprüngliche Aufnahme können Untersuchungen mit dem erstellten teilsimulierten Umgebungsmodell durchgeführt werden.

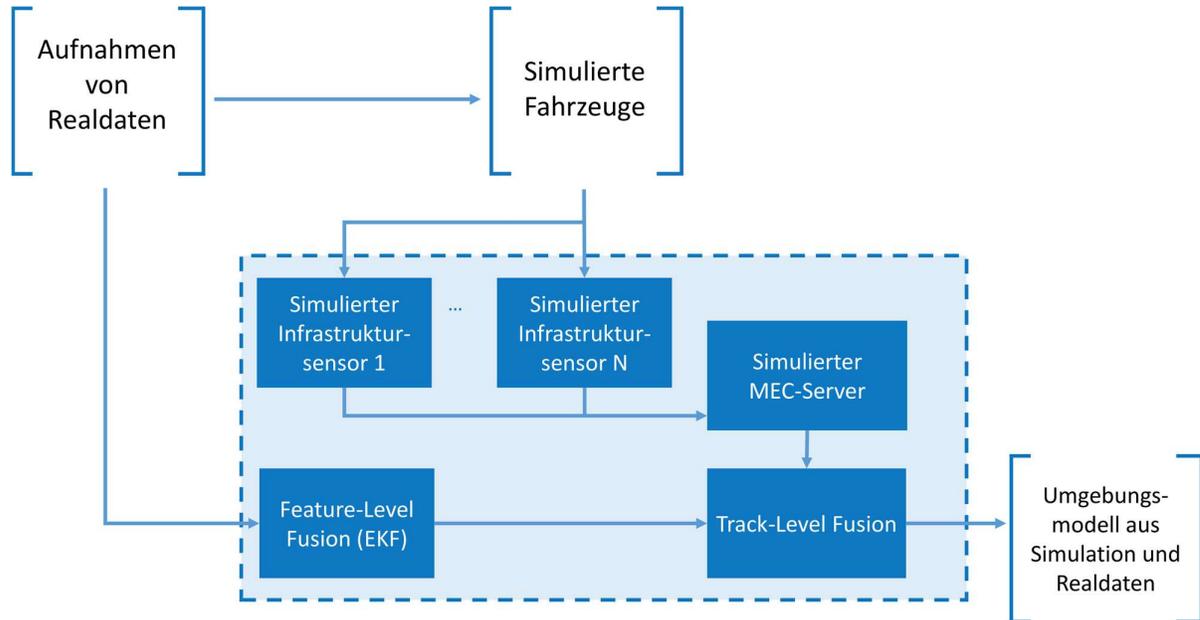


Abb. 25: Umgebung für die simulationsbasierte Auswertung der vorgestellten Fusionsalgorithmen [Gabb2019].

T2T-Auswertung mit teilsimulierten Szenen

Die teilsimulierten MEC- Daten wurden für die Auswahl eines passenden Fusionsalgorithmus verwendet. Mit Hilfe von ca. 100.000 Monte Carlo Simulationen eines Abbiegevorgangs wurde der mittlere quadratische Schätzfehler und dessen Standardabweichung bestimmt. Als Ground Truth wurden die im MEC-Server erstellten Trajektorien verwendet. Die Parameter der Fahrzeug- und Infrastruktursensorik blieben dabei unverändert.

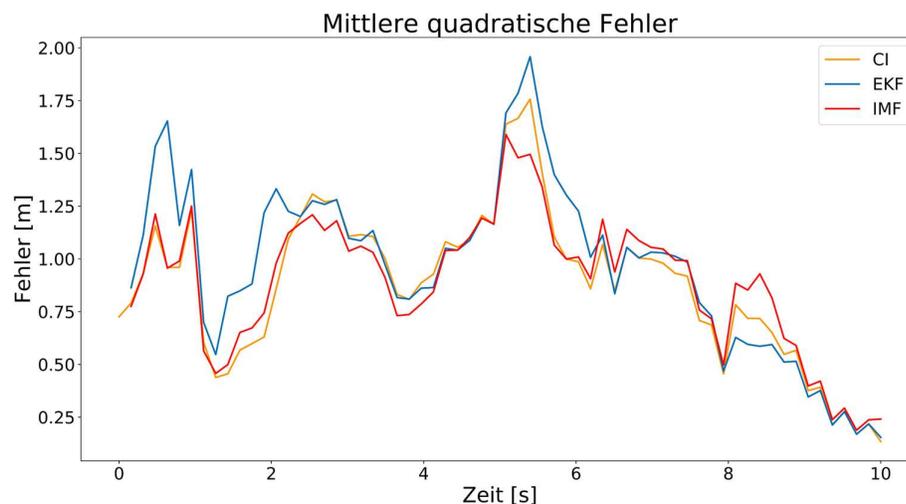


Abb. 26: Vergleich des mittleren quadratischen Fehlers verschiedener Fusionsalgorithmen [Gabb2019].

Schlussbericht - Robert Bosch GmbH

Verglichen wurden dabei: Information Matrix Fusion (IMF), Extended Kalman Filter Track Level Fusion (EKF) und Covariance Intersection (CI). Eine Auswertung der jeweiligen Fehler ist in Abb. 26 und die zugehörigen Standardabweichungen in Abb. 27 dargestellt. Die Algorithmen unterscheiden sich dabei u.a. an deren Voraussetzungen. Für die korrekte Anwendung der IMF ist einiges Vorwissen über den verwendeten Tracker auf dem MEC Server notwendig. Für die korrekte Berechnung müssen das auf dem MEC-Server angewendete Filter und dessen Annahmen bekannt sein, z.B. die Übergangsmatrix und Systemdynamik im Falle eines EKFs. Falsche Annahmen können zu inkorrekten Kovarianzmatrizen führen und somit zur Divergenz der gesamten Schätzung.

EKF hingegen setzt unkorrelierte Messungen voraus. D.h. die Messungen, in diesem Fall die MEC-Daten, müssen unabhängig von ihren vorherigen Messungen sein. Da die MEC-Daten getrackt wurden, befinden sich in jedem Zustand Informationen aus den vorhergehenden und widerspricht somit dieser Regel. Das Ergebnis ist eine nicht vorherzusehende Instabilität. In dem kurzen Testfenster der Monte Carlo Simulation kam es allerdings zu keinen invaliden Ergebnissen. Das lässt jedoch keine Abschätzung zur Stabilität bei längeren Tracks zu.

Im Gegensatz dazu benötigt man für die Anwendung von CI weder Informationen über das verwendete Trackingverfahren im MEC-Server, noch unabhängige Messungen. Die einzige Voraussetzung ist eine Normalverteilung der zu fusionierenden Größen. Diese Voraussetzung gilt jedoch auch für die beiden anderen getesteten Algorithmen. Das Ergebnis von CI ist eine obere Abschätzung der Kovarianz, nicht die optimale Lösung. Dafür ist das Ergebnis konsistent und verhindert somit die Divergenz des Fahrzeugumfeldmodells.

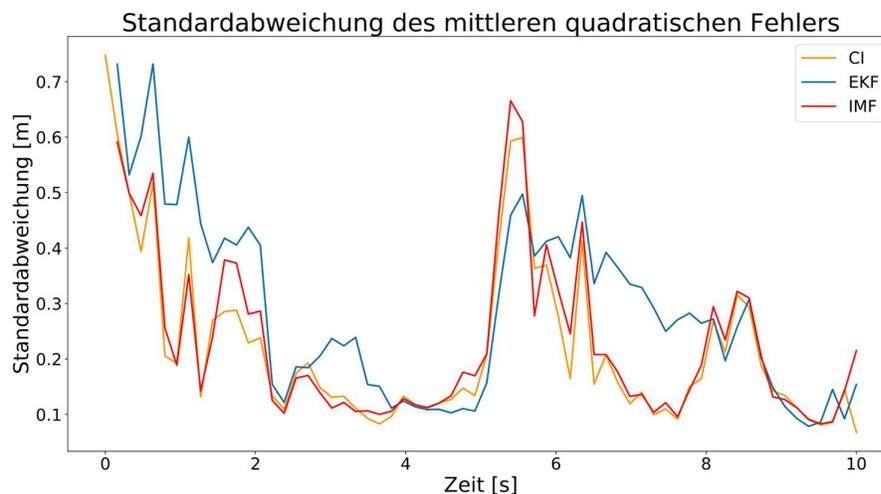


Abb. 27: Standardabweichung des mittleren quadratischen Fehlers für die verschiedenen Fusionsalgorithmen [Gabb2019]

Um Anforderungen an die Infrastruktursensorik basierend auf die vorhandene Fahrzeugsensorik treffen zu können, wurde der Informationsbeitrag der simulierten MEC-Daten zu den Gesamtfusionsergebnissen untersucht. Dabei wurde die Winkel- und Abstandsvarianz der simulierten Infrastruktursensoren variiert.

Der Informationsbeitrag kann ausgedrückt werden als Verhältnis zwischen dem Kovarianzvolumen der MEC-Daten und dem kombinierten Kovarianzvolumen aus MEC- und Fahrzeugdaten derselben Tracks. Je größer das Verhältnis, desto geringer der Einfluss der vom MEC-Server empfangenen Informationen.

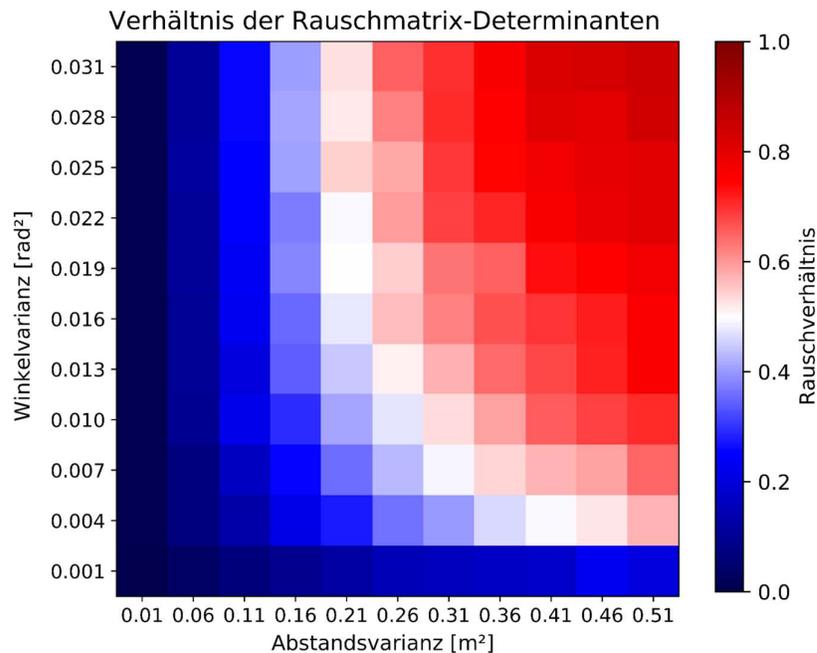


Abb. 28: Verhältnis der Rauschmatrix-Determinanten [Gabb2019].

Abb. 28 zeigt, dass die T2T-Fusion vor allem dann große Vorteile bringt, wenn das MEC-Umfeldmodell und das Umfeldmodell der Ego-Perzeption ähnlich gute Ergebnisse liefern. Im Bild sind dies die hell dargestellten Flächen. In den dunkelblau markierten Flächen hingegen ist die Qualität der Fahrzeugperzeption deutlich besser als die der MEC-Daten, sodass die MEC-Daten kaum Einfluss auf das Fusionsergebnis haben. Entsprechend ist das Ergebnis der Fusion im dunkelroten Bereich kaum noch von der Ego-Perzeption abhängig. In diesem Zusammenhang stellte sich daher die Frage, ob sich Situationen, in denen sich die T2T-Fusion lohnt bzw. nicht lohnt, vorab identifizieren lassen, sodass der Aufwand der T2T-Fusion gezielt dann eingesetzt wird, wenn die T2T-Fusion das Fusionsergebnis signifikant verbessert. Die Einschätzung hängt dabei auch stark von der Güte der Infrastruktursensorik ab: je besser die Qualität der Infrastrukturdaten, desto eher lohnt sich eine Fusion. Eine detailliertere Ausarbeitung ist [Gabb2019] zu finden.

6.4.4 UAP6.4 Verhaltensplanung

Im Rahmen der Anforderungsanalyse und Konzeptphase wurde eine modulare Struktur für alle Planungskomponenten entwickelt, sowie eine allgemeine Definition der Schnittstellen durchgeführt. Die Struktur und ihre Komponenten sind in Abb. 29 dargestellt und werden in diesem und den beiden folgenden Abschnitten detailliert dargestellt.

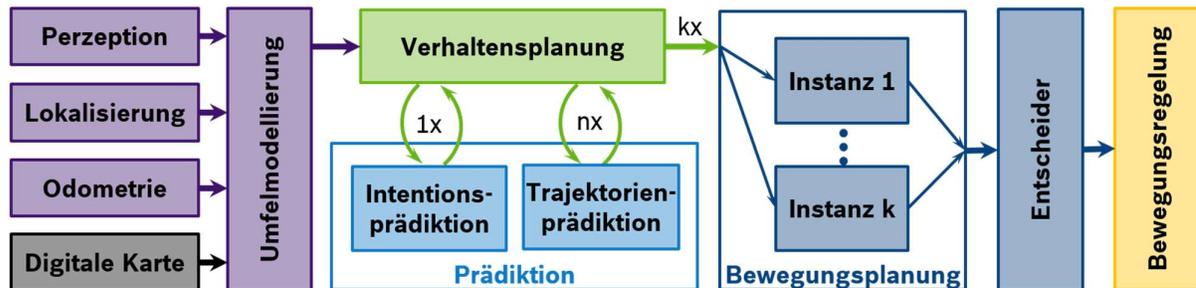


Abb. 29: Systemarchitektur zur Einbettung der Planungskomponenten (Verhaltensplanung, Bewegungsplanung), sowie der verschiedenen Schnittstellen zu den benachbarten Komponenten: Perzeption, Lokalisierung, digitale Karte (Input), Regelung (Output) und dynamische Objektprädiktion

Schnittstellen

Als Eingang der Planung wurde ein Umfeldmodell definiert. Die Hauptziele hierbei sind zum einen die zeitliche Synchronisation der Daten und zum anderen die Zuordnung von dynamischen Objekten („Agenten“) zu den in der digitalen Karte definierten Fahrspuren. Dafür wurde aus den von UAP6.3 (Perzeption) und UAP6.2 (Lokalisierung und digitale Karte) zur Verfügung gestellten Informationen eine prototypische gemeinsame Umfeld-Repräsentation erstellt, welche alle dynamischen Objekte den in der digitalen Karte definierten Fahrspuren zuordnet. Besondere Aufmerksamkeit wurde dabei auf die Berücksichtigung der Mehrdeutigkeit der Fahrspuren im Kreuzungsbereich gelegt. Eine sinnvolle Plausibilisierung der Objekt-Fahrspur Zuordnungen wurde, unter Berücksichtigung der Objektausdehnung und -orientierung, prototypisch implementiert und auf Basis von simulierten Daten evaluiert. Diese Zuordnung vereinfacht die Abbildung von Interaktion zwischen verschiedenen Agenten und ermöglicht sowohl eine effiziente Planung als auch eine einfache, Fahrspurgenaue Prädiktion.

Der Ausgang der Verhaltensplanung besteht aus den k besten Verhalten für das automatisierte Fahrzeug. Für eine effiziente Auswertung ist eine enge Verzahnung zwischen der Verhaltensplanung und der dynamischen Objektprädiktion notwendig. Zu diesem Zweck wurden Schnittstellen mit den verschiedenen Prädiktionskomponenten, die im folgenden Abschnitt detaillierter diskutiert werden, definiert.

Planungsalgorithmus – „Behavior Search“

Wie oben beschrieben soll die Verhaltensplanung k -beste Verhalten für die weitere Bewertung zur Verfügung stellen. Als Basis hierfür wurde zunächst ein Satz an grundlegenden Verhalten definiert:

- Spurfolgen – Standardfall, Folgen einer definierten Fahrspur, mit/ohne vorausfahrendem Fahrzeug
 - Spurwechsel – Wechsel zwischen zwei benachbarten Fahrspuren (z.B. Wechsel von der Beschleunigungsspur zur rechten Fahrspur auf dem Berliner Ring in Ulm)
 - Stillstand – z.B. warten auf freie vorfahrtsberechtigter Straße
 - Lücken-Verfolgung – Identifizierung und Verfolgung einer Lücke zwischen zwei Fahrzeugen auf einer vorfahrtsberechtigter Straße
- Ziel: nahtloses Einfädeln durch entsprechende Anpassung der eigenen Geschwindigkeit und damit der Ankunftszeit an der Kreuzung

Für die intelligente und effiziente Auswahl des aktuell besten Verhaltens wurden verschiedene Ansätze aus der Literatur theoretisch begutachtet. Eine vielversprechende Option ist die Kombination aus einem baumbasierten Suchverfahren und einer definierten Menge an Kostenfunktionen.

Schlussbericht - Robert Bosch GmbH

Der Verhaltensbaum wird ausgehend von einem definierten Startzustand zeitlich in die Tiefe aufgebaut. Dabei soll in jedem Zeitschritt die dynamische Objektprädiktion verwendet werden, um ein prädiziertes Umfeldmodell, das die prädizierten Objektzustände unter Berücksichtigung derer Interaktionen darstellt, zu erhalten. Auf Basis dieser prädizierten Umfeldmodelle kann z.B. frühzeitig eine mögliche zukünftige Kollision zwischen unserem Fahrzeug und einem Agenten erkannt werden.

Die Auswertung der Verhalten kann auf Basis von a-priori definierten Kostenfunktionen erfolgen. Mit diesen Kosten soll eine differenzierte Bewertung der einzelnen Verhalten und ihrer Entwicklung über die Zeit ermöglicht werden. Mögliche Kosten könnten z.B. für folgende Fälle definiert werden:

- Kollision (extreme Kosten)
- Wechsel des Verhaltens (Hysterese)
- Anhalten (Bevorzugung von nicht-stationären Zuständen)
- Geringe Geschwindigkeit (Bevorzugung von dynamischem Verhalten)
- ...

Zur Analyse der generellen Tragfähigkeit des vorgeschlagenen Konzepts (Kosten-basiertes/ -getriebenes Baum-Suchverfahren) wurde eine Testimplementierung unter Berücksichtigung einiger grundlegenden Verhalten (Spurfolgen mit und ohne vorausfahrendem Fahrzeug; Anhalten an definiertem Stoppunkt; Spurwechsel) umgesetzt. Die Implementierung wurde mit grob simulierten Daten intensiv getestet und experimentell als tragfähiges Konzept bestätigt. Mit dieser Implementierung und den definierten Verhaltens-Optionen ist es möglich alle MEC-View Use-Cases abzubilden, die ohne MEC-Server-Umfeld-Modell auskommen müssen. D.h. alle Use-Cases die als Vergleichsgrundlage für die folgende Nutzenbewertung des Gesamtsystems dienen sollen. Eine experimentelle Bestätigung auf Basis der fahrzeugeigenen Sensorik erfolgte im Realverkehr.

Fahren unter eingeschränkter Sicht

Ein wesentlicher Teil des Projektes und der Arbeit in AP6 ist der Einbezug von sichtbaren Bereichen zur robusteren Verhaltensplanung. Gerade in städtischen Bereichen mit häufig auftretenden Sichtverdeckungen durch die Infrastruktur oder semi-statischen Objekten ist es essentiell das Fahrzeugverhalten den eingeschränkten Möglichkeiten durch die begrenzt sensierbare Fahrzeugumgebung anzupassen. Abb. 30 verdeutlicht, dass bei der Anfahrt auf die Kreuzung ohne die Sichtfelderweiterung durch die Infrastruktursensorik erst sehr spät ein ausreichendes Sichtfeld durch die fahrzeugeigene Sensorik auf die vorfahrtsberechtigten Straße besteht. Daher ist die Detektion von vorfahrtsberechtigten Fahrzeugen zu diesem Zeitpunkt noch nicht möglich. Diese Einschränkung gilt nicht nur für das AD-Fahrzeug, sondern auch für jeden anderen Verkehrsteilnehmer an dieser Stelle. Die Entscheidung, ob die Kreuzung frei von Hindernissen ist, kann folglich erst getroffen werden, wenn das Fahrzeug schon sehr nahe an der Kreuzung ist und diese einsehen kann. Solange muss von einem Anhalte-Manöver ausgegangen werden, um eine sichere Fahrt zu garantieren.

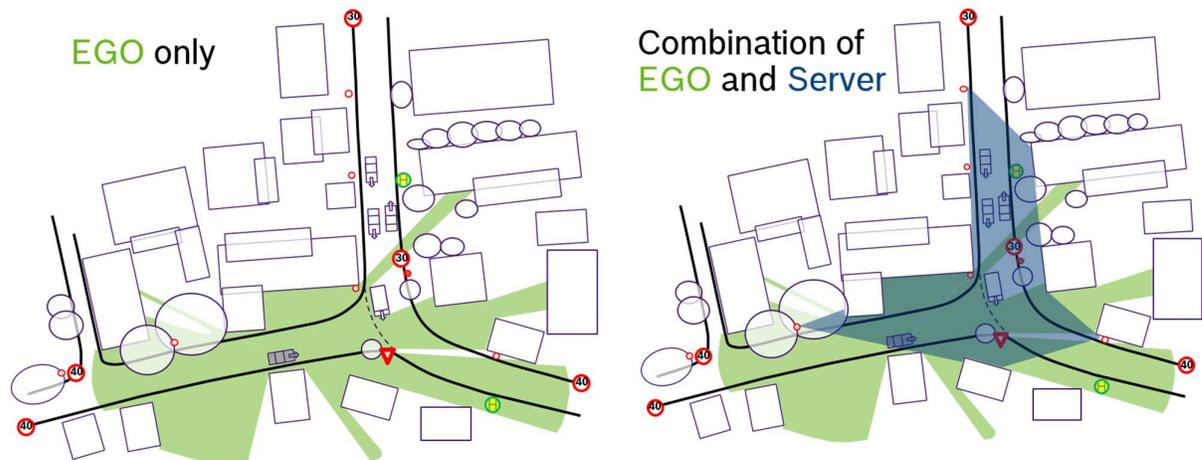


Abb. 30: Exemplarische Darstellung der Sichtbereiche eines automatisierten Fahrzeugs, mit und ohne Einbezug von Sichtbarkeitsinformationen der Infrastruktursensorik

Zur Erweiterung der Verhaltensplanung durch den Einbezug von sichtbaren Bereichen wurde ein Konzept zur Verarbeitung von Sichtbarkeitsinformation erstellt, implementiert und erfolgreich im realen Straßenverkehr in Ulm-Lehr getestet.

Eingabe für das Verfahren sind Sichtbarkeitsinformationen über die sensorisch erfassten Bereiche, die als Teilausgang der Perzeption zur Verfügung gestellt werden (sogenannte Sichtbarkeitsgitter, Abb. 31).

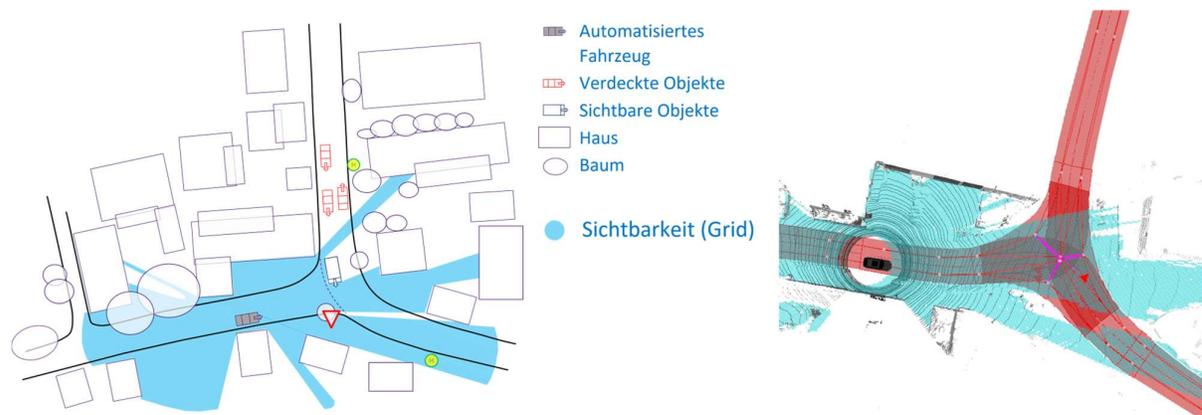


Abb. 31: Sichtbarkeitsgrid: Konzept (links) und Realdaten (rechts)

Diese Sichtbereiche können mit den Informationen der digitalen Karte zu einem hybriden Umfeld-Modell kombiniert und ausgewertet werden, sodass Rückschlüsse auf tatsächlich gesehene und objektfreie Fahrspuren gezogen werden können (Abb. 32). Dazu wird das Sichtbarkeitsgitter mit der hochgenauen digitalen Karte geometrisch überlagert, um die gesehenen Spuren zu identifizieren. Dabei werden grundsätzlich alle Lücken im Gitter, die zu klein für ein relevantes Objekt sind, gefüllt. Auf diese Weise erhält man eine große Robustheit gegenüber Ungenauigkeiten in der Perzeption, sowie potenziell dünnen, aber langen Schatten die z.B. von Laternenmasten geworfen werden. Des Weiteren werden alle Bereiche im Gitter, die von einem detektierten dynamischen Objekt besetzt sind ebenfalls gefüllt. Auf diese Art und Weise kann die nachfolgende Planung eigenständig entscheiden, ob die Einfahrt in den Kreuzungsbereich, bei insgesamt ausreichender Sicht, vor oder hinter dem jeweiligen Objekt erfolgen soll.

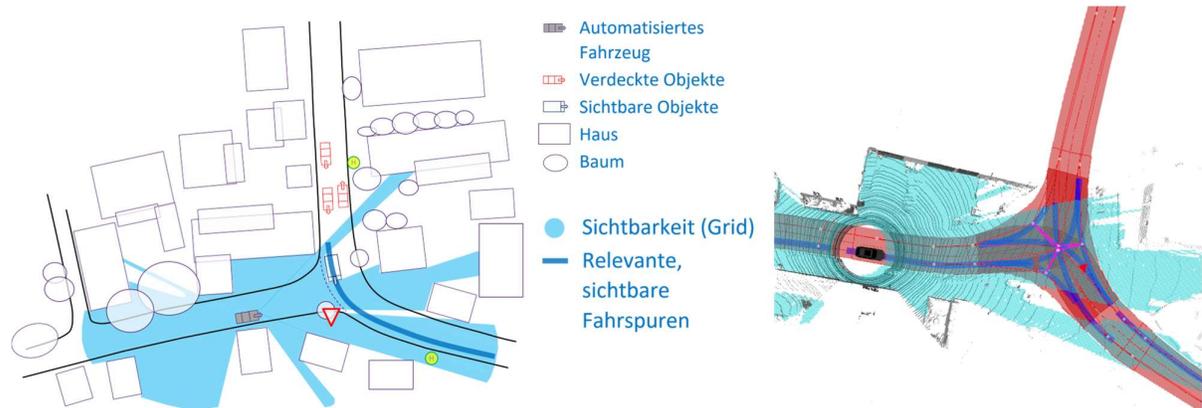


Abb. 32: Sichtbare (relevante) Fahrspuren: Konzept (links) und Realdaten (rechts)

Für den MEC-View Use-Case soll konzeptionell ein Überfahren einer Haltelinie nur erfolgen, wenn die vorfahrtsberechtigten Straße ausreichend gut gesehen und als frei bewertet wurde. Um dies prüfen zu können, wurden kartenbasiert diejenigen Fahrspuren ermittelt, die durch einen Sichtbarkeitsabgleich freigegeben werden müssen, bevor eine Weiterfahrt eingeleitet werden darf (Abb. 33).

Zur Bestimmung dieser sogenannten „notwendigen Fahrspuren“ kann aus einer Kombination der digitalen Karte mit dem aktuellen Zustand des automatisierten Fahrzeugs errechnet werden (Abb. 33). In der digitalen Karte ist zunächst einmal der Kreuzungsbereich mit allen relevanten Fahrspuren, sowie den zugehörigen Vorfahrtsregeln hinterlegt. Zusammen mit dem Zustand des automatisierten Fahrzeugs kann dann errechnet werden, wie weit die jeweiligen relevanten Fahrspuren einsehbar sein müssen. Dabei spielen verschiedene Faktoren eine Rolle: der aktuelle Abstand zur Kreuzung, die Geschwindigkeit des automatisierten Fahrzeugs, sowie die erlaubte Geschwindigkeit auf der jeweiligen vorfahrtsberechtigten Straße. Hierbei wird selbstverständlich auch eine mögliche Geschwindigkeitsüberschreitung anderer Verkehrsteilnehmer berücksichtigt.

Die Entscheidung, ob der Kreuzungsbereich ausreichend gut für eine automatisierte Weiterfahrt eingesehen wird, kann dann durch einen simplen Vergleich erfolgen: wenn die Menge der sichtbaren Fahrspuren die Menge der notwendigen Fahrspuren einschließt, wird der Kreuzungsbereich ausreichend gut gesehen.

Sobald dies der Fall ist, kann das automatisierte Fahrzeug, unter Berücksichtigung aller dynamischen Objekte in diesem Bereich, automatisch in die Kreuzung einfahren. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Perzeption alle Objekte in diesem Bereich zuverlässig erkannt hat.

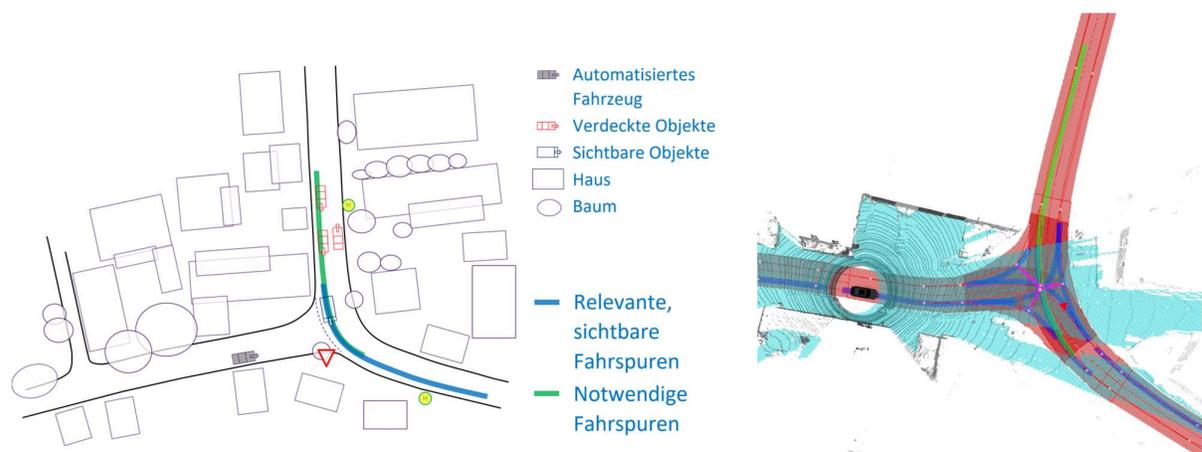


Abb. 33: Sichtbarkeitsabgleich aus gesehenen und notwendigen Fahrspuren: Konzept (links) und Realdaten (rechts)

Erweiterung der Sichtbarkeit durch die Infrastruktur

Aufgrund der in MEC-View verbauten Infrastruktursensorik kann die Kreuzung sensiert werden, um dadurch zusätzliche Sichtbarkeitsinformationen gewinnen zu können. Durch Einbeziehung dieser Informationen in die Umfeldmodellierung des AD-Fahrzeuges kann eine Planung mit dem gesamten sichtbaren Bereich (vgl. Abb. 30) erfolgen und dadurch das Fahrverhalten signifikant verbessert werden, indem z.B. ein flüssiges Auffahren ohne Anhalten umgesetzt wird. Die Ansätze, welche dies ermöglichen, werden im Folgenden vorgestellt.

Zunächst soll aber noch erwähnt werden, dass die Serverseitigen Sichtbarkeitsinformationen analog zu den fahrzeugeigenen Informationen verarbeitet werden. Dadurch kann das automatisierte Fahrzeug dynamisch auf veränderte Umgebungsbedingungen reagieren. Wenn von der Infrastruktur ein defekter Sensor oder eine, z.B. wetterbedingte, verringerte Sichtbarkeit gemeldet wird, kann der zugehörige Sichtbereich im automatisierten Fahrzeug einfach eingeschränkt oder komplett abgeschaltet werden. Dies ermöglicht dem Fahrzeug eine automatisierte Weiterfahrt unter zu mindestens teilweiser Nutzung der funktionierenden Infrastruktur.

Synchronisiertes Auffädeln auf die Vorfahrtsstraße

Durch den MEC-View Systemaufbau, bestehend aus der Infrastruktursensorik, einem generierten zentralen Umfeldmodell auf dem MEC-Server und dessen Kommunikation an das AD-Fahrzeug, ist es diesem möglich, sein Verhalten für die Situation der Sichtfelderweiterung anzupassen. Annahme hierbei ist, dass die Infrastruktursensorik es ermöglicht, den gesamten Kreuzungsbereich einsehen zu können und alle vorhandenen Objekte zu erkennen.

Für die technische Umsetzung wurde das Verhaltenskonzept eines Einfädelmanövers für das AD-Fahrzeug entwickelt, welches bestehende Lücken auf der Kreuzung analysiert, bewertet und kontinuierlich verfolgt. Dieses implementierte Verhalten ermöglicht es, Lücken auf der vorfahrtsberechtigten Straße zu identifizieren und somit frühzeitig eine Synchronisierung des Fahrzeugverhaltens einzuleiten. Ziel dieser Synchronisierung ist entsprechend, dass sich das automatisierte Fahrzeug zur richtigen Zeit mit der passenden Zielgeschwindigkeit nahtlos in den fließenden Verkehr auf der vorfahrtsberechtigten Straße einfädeln kann. Die nötigen Sicherheitsabstände sollen dauerhaft gewährt werden. Der hier vorgestellte Ansatz wurde im Rahmen der RSS 2019 veröffentlicht (vgl. Kapitel 11).

Um dies zu erreichen, werden auf Basis der digitalen Karte die relevanten Fahrspuren für ein Einfädelmanöver identifiziert und entlang dieser alle vorhandenen Lücken bestimmt (siehe Abb. 34 in schwarz). Die so erhaltenen Lücken werden anhand mehrerer Faktoren klassifiziert, um entscheiden zu können, ob die vorhandene Lücke auch tatsächlich für das AD-Fahrzeug unter allen Einschränkungen erreichbar ist. Ein relevanter Faktor zur Bewertung ist die Lückengröße inklusive der Sicherheitsabstände zu angrenzenden Fahrzeugen in Abhängigkeit der Geschwindigkeit. Dies wird sowohl zum aktuellen Zeitpunkt als auch zum prädierten Zustand der Lücke zum Zeitpunkt des Einfädelns bewertet. Ein weiterer Faktor ist die Zeit, die das AD-Fahrzeug braucht, um frühestmöglich am Einfädelpunkt an der Kreuzung zu sein. Hierbei werden kinodynamische Einschränkungen, der aktuelle Zustand des AD-Fahrzeuges, geltende Höchstgeschwindigkeiten sowie krümmungsbedingte Geschwindigkeitsbeschränkungen der unterliegenden Karte berücksichtigt. Anhand der genannten Kriterien kann bewertet werden, ob eine Lücke zum Einfädelzeitpunkt groß genug und für das AD-Fahrzeug erreichbar ist. Diese als valide klassifizierten Lücken sind in Abb. 34 in grün dargestellt. Bei mehreren validen Lücken muss sich das AD-Fahrzeug entscheiden, welche davon ausgewählt wird. In unserem Fall wurde eine zeitoptimale Variante gewählt, sodass sich das AD-Fahrzeug schlichtweg für die Lücke entscheidet, die bereits am nächsten an der Kreuzung ist, um diese möglichst zeiteffizient zu überqueren (in Abb. 34 blau dargestellt).

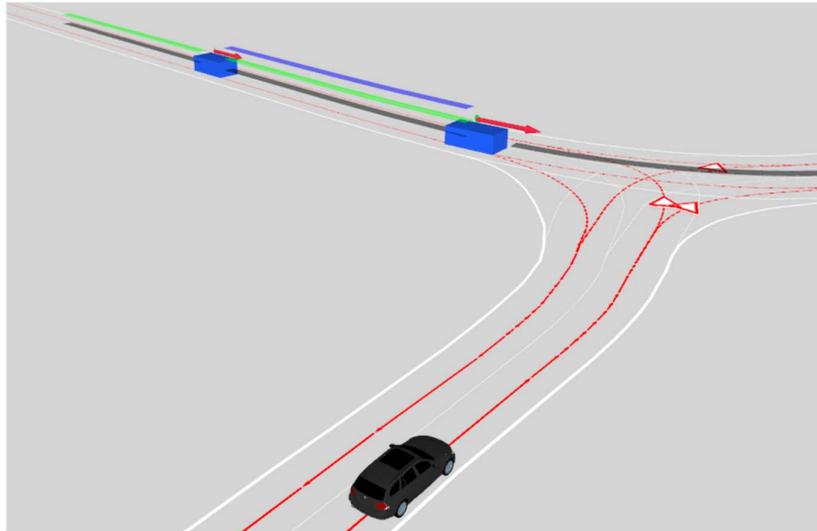


Abb. 34: Analyse, Identifikation und Auswahl von Lücken zwischen verschiedenen Fahrzeugen auf einer kreuzenden Vorfahrtsstraße. Die Kreuzungsgeometrie und Vorfahrtsregeln ist durch die HAF-Karte gegeben. Alle identifizierten Lücken sind in schwarz, die erreichbaren Lücken in grün und die ausgewählte Lücke in blau dargestellt. In diesem Zusammenhang bedeutet „erreichbar“, dass die Lücke mit normalen Fahrmanövern, begrenzt durch die kinodynamischen Beschränkungen (z.B. bezogen auf Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck), erreicht werden kann.

Für die ausgewählte Lücke wird dann eine dedizierte Bewegungsplanung durchgeführt. Durch eine eindimensionale, spurbasierte Prädiktion der Lücke zum Einfädelpunkt wird ein Trajektorien-Endpunkt als Tupel aus Ort, Zeit(-intervall) und Geschwindigkeit definiert. Unter Verwendung verschiedener Bewegungsprofile, die durch unterschiedliche Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufe charakterisiert sind, werden verschiedene Trajektorien zu diesem Endpunkt geplant. Abb. 35 zeigt einige Beispieltrajektorien, wobei die z-Achse jeweils die Geschwindigkeit abbildet.

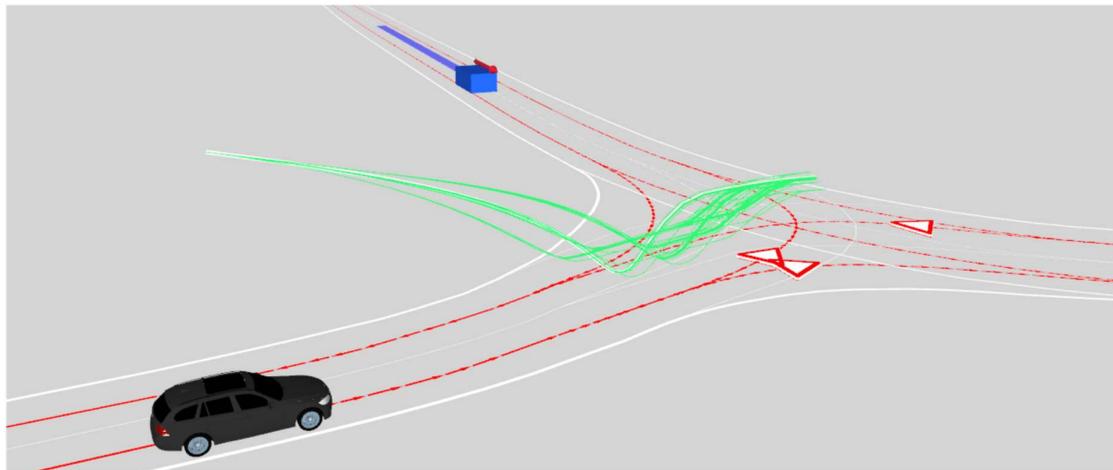


Abb. 35: Beispiel eines Trajektorienbündels (grün) für eine ausgewählte Lücke (blau). Die Trajektorien sind in der z-Achse mit der geplanten Geschwindigkeit skaliert. Die ausgewählte Lücke definiert den Endpunkt aller Trajektorien als Kombination aus Position, Geschwindigkeit und Zeit. Zusammen mit dem Startpunkt, gegeben durch die aktuelle EGO-Position, können verschiedene Trajektorien mit verschiedenen Bewegungsprofilen definiert werden. Die Bewegungsprofile unterscheiden sich durch Brems- und Beschleunigungszeitpunkte, sowie maximale Geschwindigkeit und Beschleunigung. Zur Auswahl der finalen Trajektorie wird eine Kostenfunktion verwendet.

Simulative Analyse des Synchronisierten Auffädels

Da wir die bestmögliche Lücke für die aktuelle Verkehrssituation finden müssen, hängt die gewählte Lücke stark vom Kreuzungsverkehr ab. Da initial noch keine qualitativ hochwertigen echten MEC-Daten zur Verfügung standen, wurde das Konzept zunächst in der Simulation evaluiert.

Die Evaluierung in der Simulation mit verschiedenen Verkehrsdichten ergab eine vorläufige Aussage über den Nutzen von Infrastruktursensorik im MEC-View System und wird in folgendem Abschnitt vorgestellt.

Für die Evaluation wurden zwei Szenarien verglichen: Einerseits eine Fahrt ohne Infrastruktursensorik unter Beachtung der Sichtbarkeitseinschränkungen. Hierbei wurde die Sichtbarkeitsfreigabe kurz vor der Kreuzung gegeben, d.h. das Fahrzeug muss sich der Kreuzung nähern und von einem Anhalteverhalten ausgehen. Eine Weiterfahrt über die Kreuzung ist erst nach der Sichtbarkeitsfreigabe erlaubt.

Dem gegenübergestellt wurde eine Fahrt in der gleichen Verkehrssituation mit hinzuziehen von Infrastrukturdaten, d.h. die Einschränkung der Sichtverhältnisse entfiel. Die so aufgezeichneten Fahrprofile geben Aufschluss über die Komfortabilität für die Fahrzeuginsassen.

Für die Auswertung wurden Situationen verschiedener Verkehrsdichten evaluiert (siehe Abb. 36) deren Ergebnisse in Abb. 37 und Abb. 38 dargestellt sind.

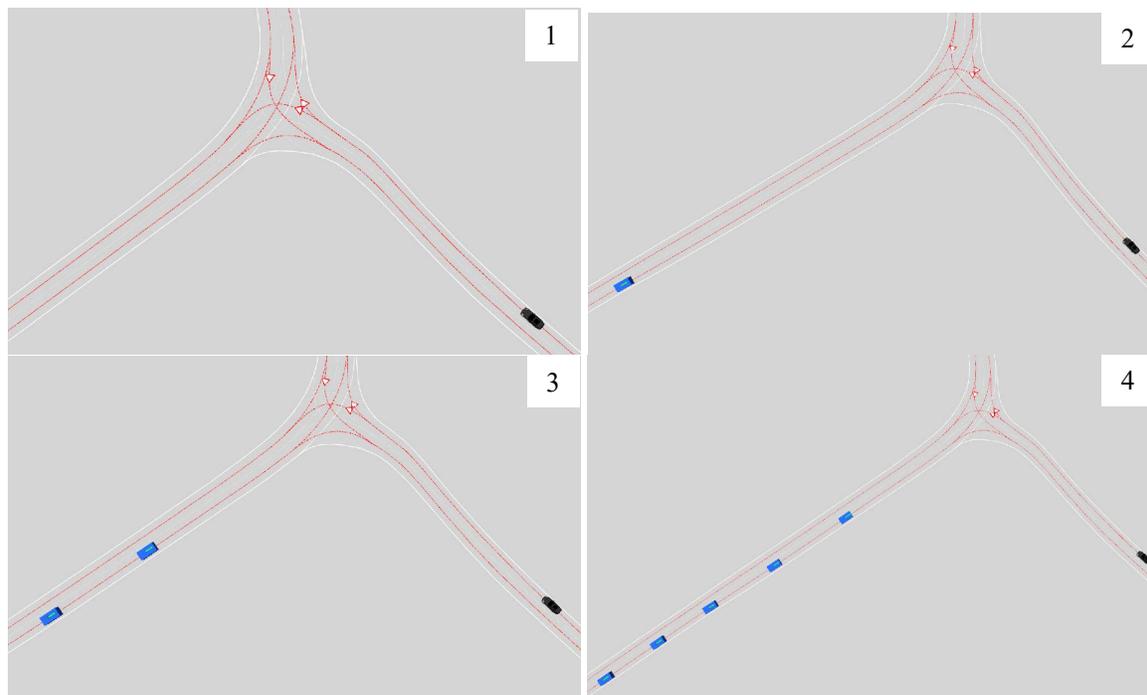


Abb. 36: Evaluerte Situationen verschiedener Verkehrsdichte.

Links oben: Keine kreuzenden Objekte. **Rechts oben:** Ein kreuzendes Objekt. **Links unten:** Zwei kreuzende Objekte. **Rechts unten:** Fünf kreuzende Objekte. Die Startposition wird für das EGO Fahrzeug zur Reproduzierbarkeit konstant gehalten.

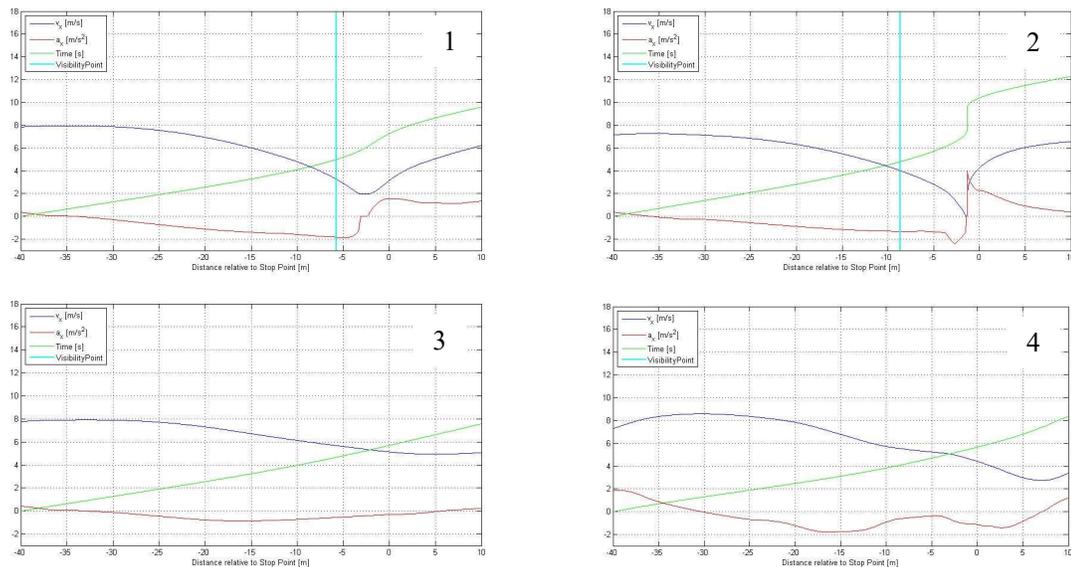


Abb. 37: Fahrprofile für die oberen Situationen aus Abb. 36:

Links: Fahrprofil für eine Situation ohne kreuzende Objekte entsprechend einer freien Fahrt. Hierbei kann die Kreuzung ohne Bremsen überfahren werden. **Rechts:** Fahrprofile für eine Situation mit einem kreuzenden Objekt. Hierbei wird durch die Infrastrukturinformationen beschleunigt und vor dem kreuzenden Fahrzeug eingefädelt.

Oben: Beide Grafiken zeigen den Fall für eine Fahrt ohne Infrastruktursensorik, also mit Sichtbarkeitsfreigabe. Der Zeitpunkt der Freigabe ist durch die vertikale Linie dargestellt. **Unten:** Beide Grafiken zeigen den Fall einer Fahrt mit Infrastruktursensorik.

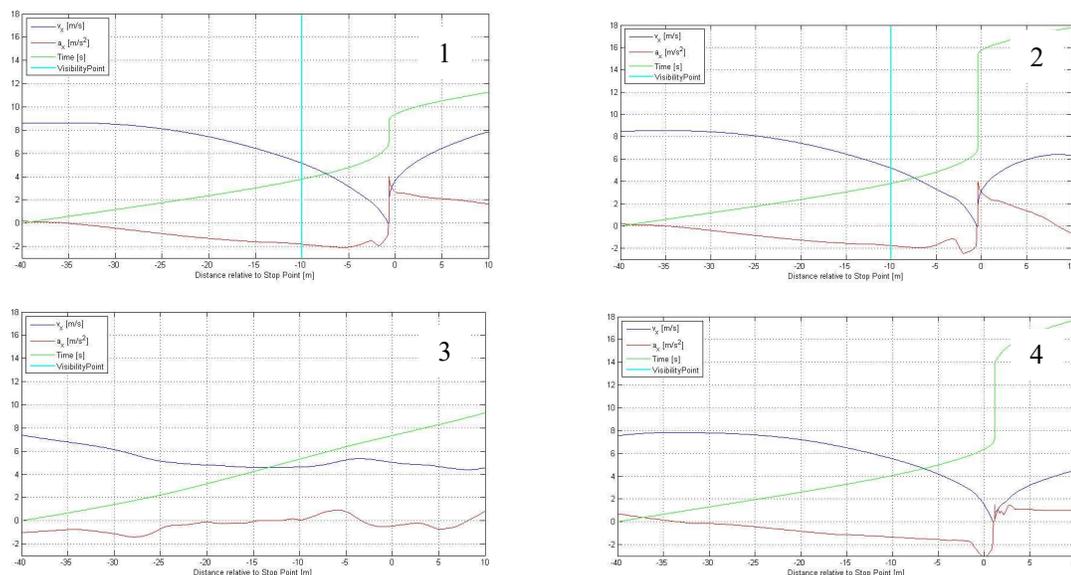


Abb. 38: Fahrprofile für die unteren Situationen aus Abb. 36:

Links: Fahrprofil für eine Situation mit zwei kreuzenden Objekte. Eingefädelt wurde hinter dem zweiten Objekt. **Rechts:** Fahrprofile für eine Situation mit fünf kreuzenden Objekt. Eingefädelt wurde hinter dem zweiten Objekt. **Oben:** Beide Grafiken zeigen den Fall für eine Fahrt ohne Infrastruktursensorik, also mit Sichtbarkeitsfreigabe. Der Zeitpunkt der Freigabe ist durch die vertikale Linie dargestellt. **Unten:** Beide Grafiken zeigen den Fall einer Fahrt mit Infrastruktursensorik.

Schlussbericht - Robert Bosch GmbH

Die Evaluierung zeigt für geringe Verkehrsdichten deutlich eine Verringerung der auftretenden Beschleunigungsschwankungen, was einer Komfortsteigerung entspricht. Auch konnte in diesen Szenarien Zeit eingespart werden, bis die Kreuzung überquert wurde.

Zu sehen ist allerdings auch, dass ab einer Verkehrsdichte, bei der es keine ausreichend großen Lücken mehr gibt, auch das Einfädelverhalten in Punkto Komfort und Zeit nur eine geringe Performancesteigerung erzielt.

KPI Analyse

Im Rahmen der simulativen Tests der Planungsalgorithmen wurde auch eine erste detaillierte KPI-Analyse durchgeführt. Dabei wurde das KPI „Erfolgsquote des automatischen Auffahrens auf die vorfahrtsberechtigten Straße soll höher als 90 % sein“ bewertet. Als Basis wird ein einfaches Szenario mit zwei Fahrzeugen auf der Vorfahrtsstraße gewählt (vgl. Abb. 39). Dabei ist die Startposition für alle Fahrzeuge über alle Simulationsläufe identisch. Die Lücke wurde so gewählt, dass ein Auffädeln bei gleichmäßiger Fahrt aller Beteiligten entsprechend der geltenden Geschwindigkeitsbegrenzungen möglich wäre. Zur Variation der Szenen wird einerseits zufällig für alle Fahrzeuge die Zielgeschwindigkeit variiert und ggf. auch innerhalb des Szenarios zufällig angepasst. Die Variation der Zielgeschwindigkeit erfolgte andererseits dabei im Bereich von ungefähr 20 bis 40 km/h bei einer erlaubten Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h. Darüber hinaus erlaubt unsere Simulation die Definition verschiedener Fahrermodelle. Diese Fahrermodelle variieren verschiedene Parameter, wie z.B. Beschleunigungs- und Bremsverhalten, oder auch Folgezeitlücken. Die Fahrermodelle können stufenlos von einem sehr vorsichtigen Fahrer, über den Durchschnitt bis hin zu aggressiven Fahrern variiert werden. Für diese Tests wurden 21 verschiedene Fahrermodelle aus dem gesamten verfügbaren Bereich (vorsichtig ... aggressiv) verwendet. Für die Evaluation wird nun jede mögliche Kombination der Fahrermodelle auf den zwei verschiedenen Fahrzeugen betrachtet. Insgesamt ergeben sich hier 441 Kombinationen, die jeweils mehrfach mit zufälliger Variation der Zielgeschwindigkeiten simuliert werden. Insgesamt wurden ungefähr 5300 Simulationen für die aktuelle Auswertung betrachtet.

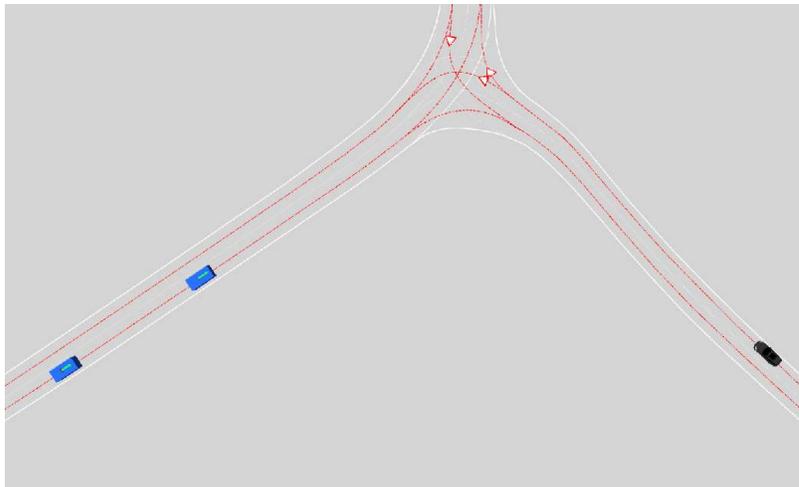


Abb. 39: Beispielszenario für die simulative KPI Auswertung.

Die Ergebnisse sind in Tab. 3 dargestellt. Dabei wurden die Ergebnisse wie folgt bewertet:

- **Erfolg:** Der Planer hat eine Lücke ausgewählt und sich erfolgreich in diese Lücke eingefädelt.
- **Teilweiser Erfolg:** Die initial ausgewählte Lücke musste verworfen werden, dafür ist aber das Einfädeln in eine andere Lücke erfolgreich absolviert worden. Erfolgreich in diesem Zusammenhang bedeutet, dass das Einfädeln ohne Anhalten und ohne übermäßig starke Geschwindigkeitsreduktion (umgangssprachlich: „kriechen“) erfolgt ist. Der erlaubte Geschwindigkeitsbereich wurde empirisch definiert als:

$$\left(v > 9 \frac{\text{km}}{\text{h}} \right)$$

- **Fehlschlag:** Auffahren nach Anhalten, Auffahren nach starker Geschwindigkeitsreduktion oder Auffahren hinter letztem Fahrzeug.

Tab. 3: Auswertung des Erfolgs beim automatischen Auffädeln in eine Lücke zwischen Fahrzeugen auf einer vorfahrtsberechtigten Straße. Es wurde ein Basisszenario mit verschiedenen Parametrierungen und zufälligen Variationen in ~5300 eigenständigen Simulationsläufen bewertet.

Erfolg	83.73 %
Teilweiser Erfolg	6.94 %
Fehlschlag	9.33 %

Die Ergebnisse zeigen, dass ein erfolgreiches Auffädeln, im Rahmen der obigen Definition, in 90,67% aller Simulationen möglich war. Nicht betrachtet wurden hierbei jegliche Szenarien, bei denen ein erfolgreiches Auffädeln gar nicht möglich war, da die simulierten Objekte auf Basis ihres Fahrverhaltens und Aggressivitätslevels die Lücke geschlossen haben. Diese Szenarien sind in Zukunft separat zu betrachten.

6.4.5 UAP6.5 Prädiktion dynamischer Objekte

Die Hauptaufgabe der dynamischen Objektprädiktion ist die Bereitstellung einer gemeinsamen Prädiktion aller dynamischen Objekte unter Beachtung ihrer Interaktionen. Für das im vorherigen Abschnitt beschriebene Konzept der Baum-basierten Verhaltensplanung ist es notwendig, die Objektprädiktion zu verschiedenen Zeitpunkten unter Berücksichtigung eines angepassten eigenen Verhaltens zu analysieren, um frühzeitig Kollisionen identifizieren zu können.

Zu diesem Zweck haben wir die Prädiktion konzeptionell in ein mehrstufiges hierarchisches Problem unterteilt, das Konzept ist in Abb. 40 dargestellt. Das Ziel dieser Aufteilung ist die Erreichung einer bestmöglichen Prädiktion unter Berücksichtigung von Echtzeitfähigkeitsanforderungen im Fahrzeug.

Im Rahmen dieses Projektes wurden dabei explizit nur Fahrzeuge betrachten.

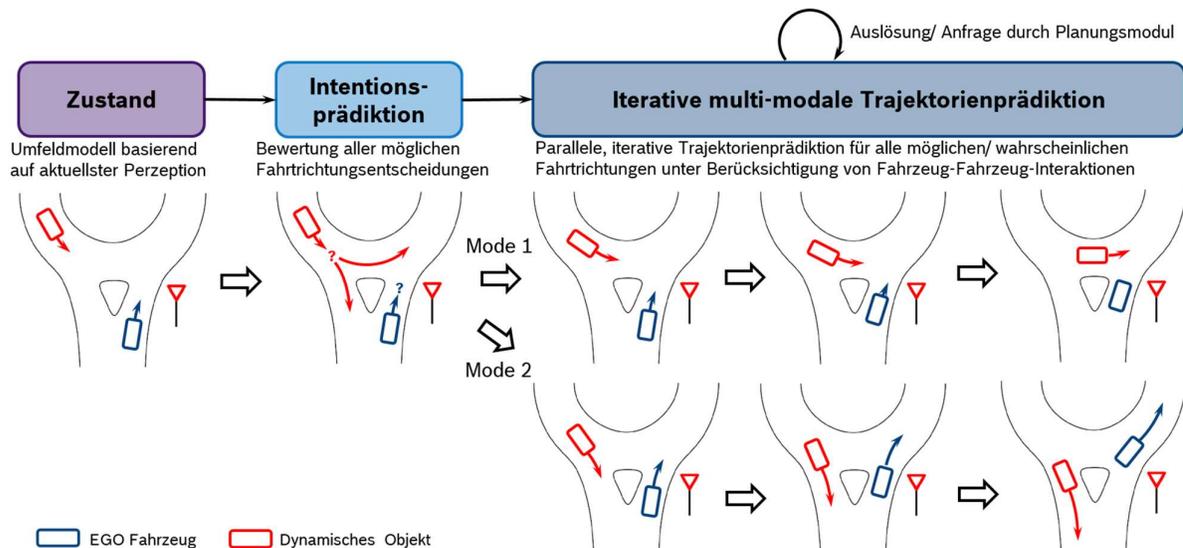


Abb. 40: Konzept für die Komponenten der dynamischen Objektprädiktion, unterteilt in die zwei Hauptblöcke: Intentionserkennung und Trajektorienprädiktion

Schlussbericht - Robert Bosch GmbH

Hierarchische Prädiktion

Die hierarchische Prädiktion gliedert sich konzeptionell in drei Ebenen:

- Intentionserkennung (fahrzeugspezifisch)
- Eindimensionale Trajektorienprädiktion (interaktionsspezifisch)
- Zweidimensionale Trajektorienprädiktion (interaktionsspezifisch)

Bei der Intentionserkennung sollen die Fahrer-/ Fahrzeug- spezifischen Intention ermittelt werden. Dabei handelt es sich vorrangig um die probabilistische Bewertung von abstrakten Fahrtrichtungsentscheidungen, z.B.: geradeaus/ rechts/ links an der nächsten Kreuzung. Da die Fahrtrichtungsentscheidung i.d.R. nicht von anderen Fahrzeugen beeinflusst wird, kann diese Prädiktion einmalig für jedes neue Objekt der Perzeption durchgeführt werden. Das Ergebnis der Intentionserkennung wäre dann eine probabilistische Liste aller möglichen Intentionen. Jede Intention, deren Wahrscheinlichkeit ein definiertes Existenzminimum überschreitet, kann und muss in der folgenden Trajektorienprädiktion separat betrachtet werden.

Die Hauptaufgabe der Trajektorienprädiktion ist die iterative Prädiktion aller Agenten entlang der Straße und unter Berücksichtigung aller Agent-Agent-Interaktionen. Die Trajektorienprädiktion soll sowohl von der Verhaltensplanung, als auch der Trajektorienplanung verwendet werden. Durch den iterativen Charakter der Prädiktion ist hierbei von einer großen Anzahl an Prädiktionsschritten innerhalb eines Planungszyklus auszugehen. Aus diesem Grund muss die Laufzeit der einzelnen Prädiktionsschritte klein gehalten werden. Zur Vereinfachung des Prädiktionsproblems sollen daher alle Agenten mit Hilfe der digitalen Karte entlang ihrer jeweiligen Fahrspuren präzisieren werden. Unter Berücksichtigung der gegebenen Geschwindigkeiten und Beschleunigung soll die Prädiktion zunächst als vereinfachte Trajektorienplanung umgesetzt werden. Zusätzlich sollen hierbei nochmal zwei Fälle unterschieden werden: eindimensionale und zweidimensionale Prädiktion/ Planung. Für die eigene Verhaltensplanung ist es voraussichtlich nicht notwendig, die exakte zweidimensionale Position zu jeder Zeit zu kennen. Stattdessen sollte eine eindimensionale Prädiktion von Agenten entlang der Karte ausreichend sein. Die zweidimensionale Prädiktion soll dann von der Trajektorienplanung z.B. zur detaillierten Kollisionsbewertung über die Zeit verwendet werden.

Messdaten

Die Umsetzung der Prädiktion sieht den Einsatz von Machine-Learning-Ansätzen vor. Zu diesem Zweck wurden große Mengen an realen Objektdaten (insbesondere Trajektorien) benötigt. Dementsprechend wurden Messfahrten durchgeführt und eine eigene Datenbank erstellt. Da die Güte der geplanten Machine-Learning-Ansätze mit steigender Datenbankgröße typischerweise nichtlinear wächst, wurde die Datenbank kontinuierlich über die gesamte Projektlaufzeit erweitert.

Deep Learning basierte Intentionsprädiktion

Aufbauend auf der Arbeit von Baumann et.al.¹ wurde eine Deep Learning basierte Intentionsprädiktion für Fahrzeuge an der Testkreuzung in Ulm entwickelt.

Abb. 41 zeigt die unterliegende Netzstruktur, einen Convolutional Autoencoder. Als Input werden mehrere 2D Gridmaps verwendet. Diese enthalten die folgenden Informationen (vergleiche Abb. 42, rechts):

- statische Umfeldrepräsentation: wird auf Basis der digitalen Karte erstellt und erlaubt die Identifikation der Szenario-spezifischen EGO- und Gegenfahrspur (grau/ grün)
- EGO-Trajektorie inklusive Geschwindigkeitsinfo (Historie + zukünftiges Label)

Die Ausgabe des Netzes ist im linken Teil von Abb. 42 dargestellt. Jede Zelle der Input-Grids wird bezüglich ihrer Zugehörigkeit zum zukünftigen Pfad klassifiziert, diese Klassifizierung ist in der Abbildung als Heatmap dargestellt.

¹ BAUMANN, U.; GLAESER, C.; HERMAN, M.; ZOELLNER, J. M. *Predicting Ego-Vehicle Paths from Environmental Observations with a Deep Neural Network*, IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2018

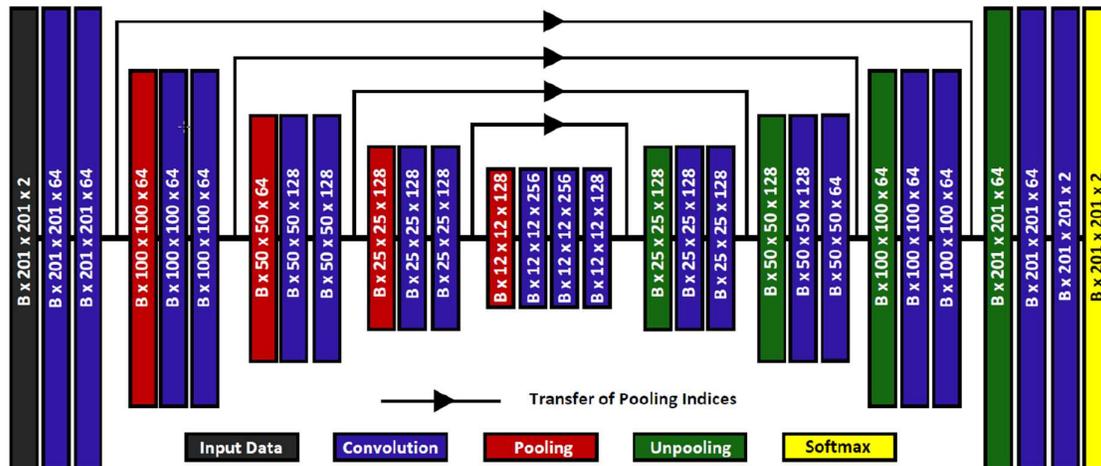


Abb. 41: Netzstruktur: Convolutional Autoencoder.

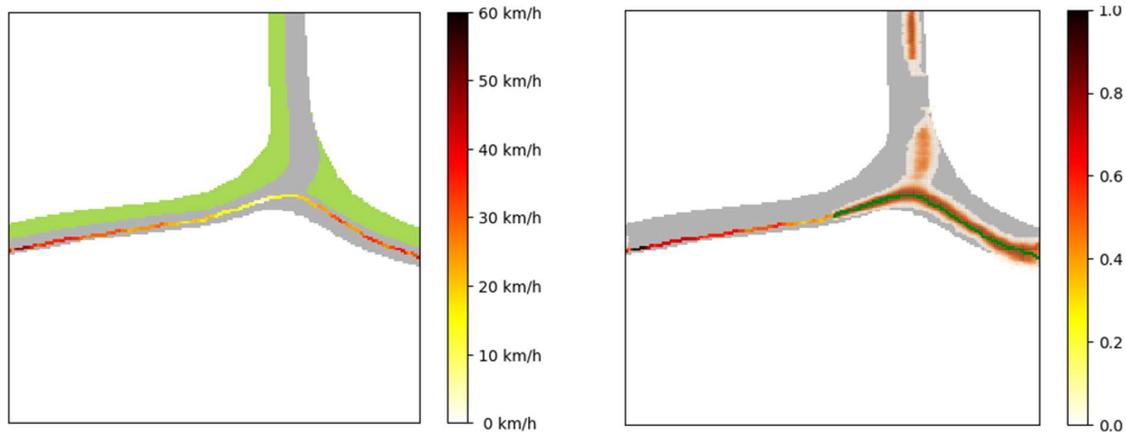


Abb. 42: Exemplarischer Netzwerk In- und Output für die MEC-View Testkreuzung in Ulm.

Links: Kombinierte Input grids: eigene mögliche Fahrspuren in grau; Fahrspuren des Gegenverkehrs (grün); Trajektorie inklusive Geschwindigkeitswerte (Farbverlauf). **Rechts:** Netzwerkoutput: die Heatmap visualisiert die Prädiktionswahrscheinlichkeit für jede Zelle. Die tatsächlich gefahrene Trajektorie ist in grün dargestellt.

Im Rahmen der bisherigen Arbeit an der Objektprädiktion haben wir gezeigt, dass wir auf Basis von Trajektorien und einer Grid-basierten Darstellung (vgl. Abb. 43) in der Lage sind, die verschiedenen existierenden Modalitäten (z.B. links oder rechts abbiegen) zu erkennen. Ebenso ist es möglich dem Fahrzeug mit zunehmender Annäherung an die Kreuzung eine dieser Modalitäten zuverlässig zuzuordnen.

Allerdings sind wir zu dem Schluss gekommen, dass wir auf Basis dieser Daten sehr stark bezüglich des Prädiktionshorizontes limitiert sind. D.h. wir können i.d.R. nur sehr kurz vor der Kreuzung erkennen, ob ein Fahrzeug links oder rechts abbiegen wird. Dies ist gerade in Ulm-Lehr natürlich auch durch die Kreuzungsgeometrie (sehr enge Nebenstraße, sowie Kurve in der Hauptstraße) und die geltenden Geschwindigkeitsbegrenzungen (30 – 40 km/h) begründet.

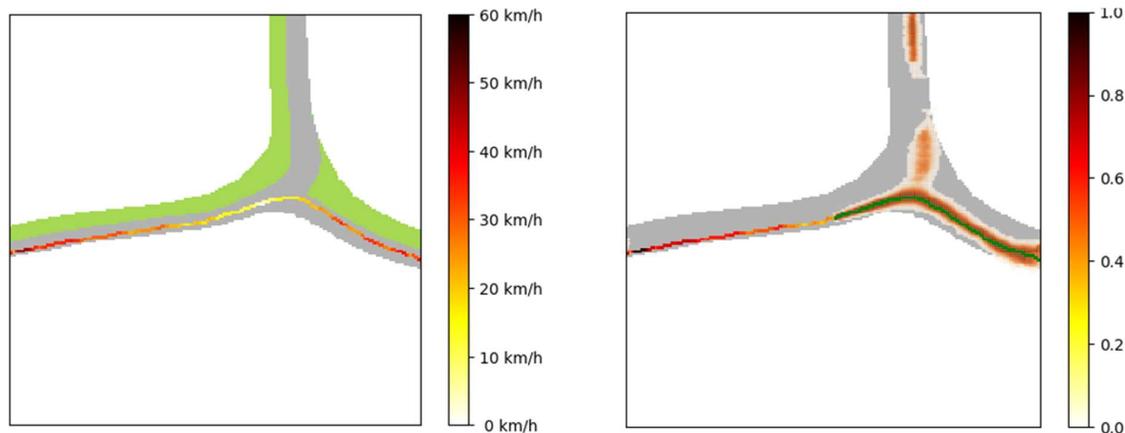


Abb. 43: Aktueller Netzwerk in- und output für die MEC-View Testkreuzung in Ulm.

Links: Kombinierte Input grids: eigene mögliche Fahrspuren in grau; Fahrspuren des Gegenverkehrs (grün); Trajektorie inklusive Geschwindigkeitswerte (Farbverlauf). **Rechts:** Netzwerkoutput: die Heatmap visualisiert die Prädiktionswahrscheinlichkeit für jede Zelle. Die tatsächlich gefahrene Trajektorie ist in grün dargestellt.

Aus diesem Grund wurde analysiert, inwiefern wir durch zusätzliche Information eine bessere und vor allem zeitlich frühere Vorhersage erreichen können. Dazu wurde insbesondere die Verarbeitung von Videobildern mit tiefen neuronalen Netzen (Deep Learning – Convolutional Neural Networks) untersucht.

Blinkerererkennung

Als ersten Schritt hierzu wurde an einer Blinkerererkennung auf Basis unser, unterm dem Spiegel verbauten, Seitenkameras gearbeitet. Zu Gunsten einer höheren Detektionsreichweite haben wir die sonst bei Seitenkameras üblichen 180° Objektive durch 90° Objektive ersetzt. Zusammen mit der Auflösung von ~2MP ermöglicht uns das eine theoretische Objekterkennung in bis zu 50 Metern Entfernung.

Für unseren initialen Test haben wir einige Szenen mit stehendem EGO-Fahrzeug aufgenommen und manuell gelabelt.

Für die eigentliche Blinkerererkennung verwenden wir ein Netz entsprechend Abb. 44. Das Netz besteht dabei aus zwei Teilen: einen „convolutional neural network“ zur Extraktion von Features aus dem Bild und eine „recurrent neural network“ zur Analyse der Zeitreihe. Durch diese Zweiteilung kann Zunächst unter Nutzung eines Autoencoders (vergleichbar mit der Netzstruktur aus unserer bisherigen Arbeit) das Neuronale Netz zur reinen Featureextraktion trainiert werden. Da es sich hierbei um ein sogenanntes „unsupervised learning“ Problem handelt, kann das Netz einfach mit beliebig vielen ungelabelten Bildern trainiert werden. Die Hauptaufgabe dieses ersten Netzteils ist letztendlich die Reduktion der Inputgröße in den rekurrenten zweiten Teil des Netzes aus Abb. 44. Diese Reduktion ermöglicht uns diesen zweiten Teil mit deutlich reduzierter Datenmenge zu trainieren und reduziert somit auch die Anforderung an (teure) gelabelte Daten).

Die ersten Ergebnisse des Trainings sind in der Konfusionsmatrix in Abb. 45 zu sehen. Es ist zu sehen, dass bereits eine gute Unterscheidung zwischen blinkenden und nicht blinkenden Fahrzeugen möglich ist. Die Verwechslung von rechtem und linkem Blinker kommt quasi nicht vor.

Mit einer durchschnittlichen Genauigkeit von ~80% ist natürlich noch Verbesserungspotential identifizierbar.

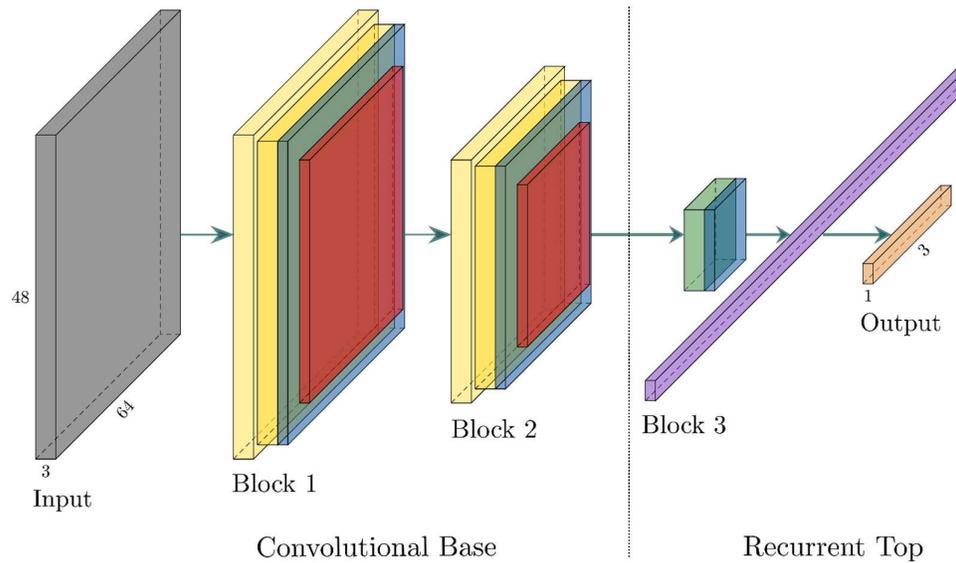


Abb. 44: Neuronales Netz zur Blinkerkennung. Eingang: Bild im Format 48*64 Pixeln mit 3 Farbkanälen; Ausgang: Klassifikation (links, rechts, aus); Netz: Das Netz besteht aus zwei Teilen: einer Vorverarbeitung durch ein convolutional neural network (zur Extraktion von Features aus dem Bild) und einer Erkennung des Blinkerstatus auf Basis eines rekurrenten Netzes (dieses enthält interne Speicher und ist entsprechend auf die Verarbeitung von Zeitreihen ausgelegt).



Abb. 45: Konfusionsmatrix der Blinkerkennung. Initial ist bereits eine gute Unterscheidung zwischen den verschiedenen Klassen erkennbar. Außerdem ist gut ersichtlich, dass das Netzwerk sehr gut zwischen einem linken und rechten Blinker unterscheiden kann.

Pfadprädiktion

Im Rahmen unserer bisherigen Arbeit wurde die Prädiktion von Pfaden und Trajektorien für verschiedene Objekte auf Basis von zweidimensionalen Gridkarten untersucht. Im Rahmen dieser Arbeiten wurde festgestellt, dass eine echtzeitfähige Umsetzung für alle im vom MEC-Server bereitgestellten Objekte auf dem Fahrzeug nicht realistisch ist. Daher wurde untersucht, inwiefern aufbauend auf dieser Arbeit stattdessen die Planungsalgorithmen durch eine EGO-Prädiktion verbessert werden können. Ziel ist auf Basis von menschlichen Beispieltrajektorien, einen realistischen Referenzpfad zu generieren. Dieser Referenzpfad kann dann von den Planungsalgorithmen verwendet werden um menschlicheres Verhalten, vor allem in Kurven, abzubilden.

Für die Umsetzung werden von verschiedenen menschlichen Fahrern eingefahrene Beispieltrajektorien, sowie die aktuelle Fahrspur aus der HAD-Karte verwendet. Die Informationen werden, ähnlich wie in der bisherigen Arbeit, in mehreren zweidimensionalen Gridkarten repräsentiert. Die Ausgabe des Netzes ist wieder eine Prädiktion, welche Punkte im Grid zum zukünftigen Pfad gehören. Anschließend werden verschiedene einzelne Ausgaben des Netzes gemeinsam betrachtet, um den gewünschten menschlichen, realistischen Referenzpfad für einen längeren Kartenabschnitt zu generieren. Da die Karte im Wesentlichen statisch ist, können diese Analysen und Berechnungen offline ausgeführt werden, daher sind auch keine besonderen Anforderungen an die Rechenzeit bzw. Echtzeitfähigkeit nötig.

Ein beispielhaftes Ergebnis für eine etwa 200m lange Straße ist in Abb. 46 dargestellt und zeigt qualitativ die Erreichung der gewünschten Pfadplanung, z.B. durch aktives „Schneiden“ von Kurven.

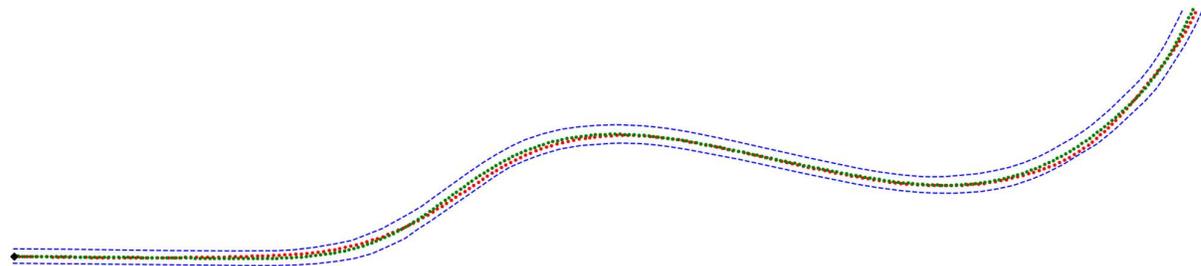


Abb. 46: Qualitatives Ergebnis der EGO-Pfadprädiktion für einen ~200m langen Straßenabschnitt. Die Spurmarkierungen sind in blau, der aktuell verwendete Referenzpfad in grün und der neu generierte realistischere Pfad in rot dargestellt. Das Ergebnis zeigt qualitativ das gewünschte Verhalten, wie z.B. schneiden von Kurven, anstatt Folgen einer definierten Mittellinie.

Ein weiteres qualitatives Ergebnis ist in Abb. 47 dargestellt. Das Szenario zeigt die Durchquerung eines Kreisverkehrs auf einer Landstraße in der Nähe des BOSCH Forschungscampus in Renningen. Das Ergebnis zeigt, dass das Netz erfolgreich gelernt hat menschliches Verhalten, vor allem bzgl. „Schneiden“ von Kurven, abzubilden.

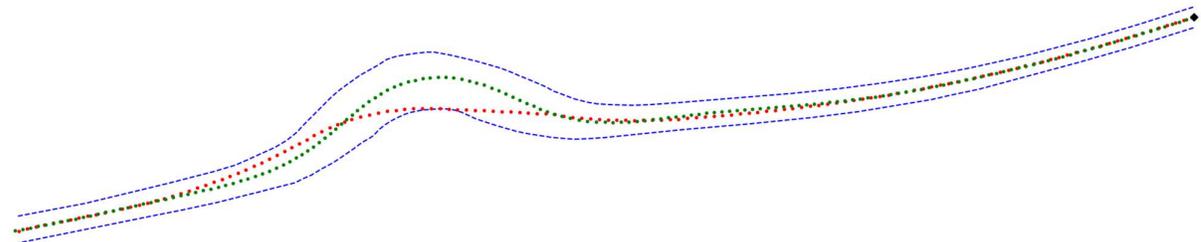


Abb. 47: Qualitative Pfadprädiktion für die Durchquerung eines Kreisverkehrs („gerade aus über den Kreisverkehr“). Spurmarkierungen in blau, Referenzmittellinie in grün, realistischer Pfad in rot. Der prädiizierte Pfad zeigt, dass erfolgreich menschliches Verhalten zum „Schneiden“ von Kurven gelernt wurde.

6.4.6 UAP6.6 Trajektorienplanung und Bewegungsregelung

In diesem Abschnitt werden einige Algorithmen der Trajektorienplanung (in Abb. 29 Abb. 29: Systemarchitektur zur Einbettung der Planungskomponenten (Verhaltensplanung, Bewegungsplanung), sowie der verschiedenen Schnittstellen zu den benachbarten Komponenten: Perception, Lokalisierung, digitale Karte (Input), Regelung (Output) und dynamische Objektprädiktion Bewegungsplanung genannt), sowie die unterlagerten Bewegungsregler näher beleuchtet.

Trajektorienplanung

Bestehende Verfahren der Trajektorienplanung wurden im BOSCH Versuchsträger in Betrieb genommen und sowohl auf der Teststrecke in Renningen, als auch auf der Pilotanlage in Ulm-Lehr getestet, analysiert und evaluiert. Auf Basis dieser Versuchsfahrten wurden erste Anpassungsbedürfnisse identifiziert, um den Fahrzeuginsassen ein komfortables Fahrgefühl im urbanen Bereich gewährleisten zu können. Die Anpassungen an einen urbanen Use-Case können einerseits in die Generierung von komfortablen Trajektorien und andererseits in auftretende Probleme bei der Umstellung von einem Highway auf einen urbanen Use-Case unterteilt werden.

Grundlage des verwendeten Verfahrens zur Trajektoriengenerierung ist die Berechnung einer Referenzlinie, entlang der sich ein generiertes Trajektorienbündel orientiert. Diese Linie kann in erster Näherung durch die Fahrspurmittellinie beschrieben werden, welche für Strecken mit geringen Kurvenkrümmungen und Krümmungsänderungen für ein komfortables Fahren ausreicht. Um in urbanen Bereichen den Fahrzeuginsassen ein komfortables und menschliches Fahrverhalten erleben zu lassen, muss die Berechnung der Referenzlinie dem menschlichen Verhalten angepasst werden. Hierunter fällt beispielsweise das Schneiden einer Kurve beim Verlassen eines Kreisverkehrs, wodurch laterale Beschleunigungskräfte reduziert werden und somit direkt der Komfort als Funktion auftretender Beschleunigungen gesteigert werden kann.

Gerade bei sich ändernden Sichtbarkeitsbereichen und damit verbundenen Möglichkeiten in sich bietende Lücken zwischen zwei Fahrzeugen einfädeln zu können, muss ein dynamisch geplantes Verhalten durch die generierte und selektierte Trajektorie gewährleistet werden. Die bestehenden Verfahren führen diesbezüglich zu einem unkomfortablen und trägen Fahrzeugverhalten, sowohl bei der Anfahrt auf einen Stoppunkt bei niedrigen Geschwindigkeiten, als auch beim Umschalten eines Anhalte- auf ein Weiterfahrverhalten. Hierfür wurden einerseits die Verfahren zur Generierung von Anhaltetrajektorien hinsichtlich einer dynamischeren Trajektorienauswahl angepasst und im Fahrzeug getestet. Andererseits wurde ein Konzept zur Behandlung eines Verhaltenswechsels seitens der Trajektorienplanung erstellt und prototypisch implementiert.

Durch ein hochdynamisches Fahrzeugumfeld im städtischen Bereich und den damit verbundenen hohen Anforderungen an eine Trajektoriengenerierung hinsichtlich Genauigkeit, Frequenz und Echtzeitfähigkeit ergab sich ein fortlaufender Optimierungsbedarf bezüglich benötigter Rechenzeit und -leistung entlang der gesamten Signalkette. Um echtzeitfähig zu bleiben, wurde die Generierung verschiedener Trajektorienbündel parallelisiert.

Für eine Verhaltensplanung mit zusätzlich integriertem Einfädelverhalten wurde ebenfalls ein Konzept zur Trajektorien-Planung erstellt. Dessen Planungseingang sind unter anderem die Entfernung zur Kreuzung, die Zeit, zu welcher das automatisierte Fahrzeug an der Kreuzung sein soll und die prädizierte Geschwindigkeit, die das kreuzende Fahrzeug an der Kreuzung vermutlich haben wird. Die Trajektorien-Planung für ein Einfädelverhalten soll gewährleisten, dass Trajektorien gesampelt werden, die das automatisierte Fahrzeug zur richtigen Zeit und mit der entsprechenden Geschwindigkeit an der Kreuzung ankommen lassen.

Auf Basis dieser Werte werden mit einem Sampling-Ansatz Trajektorien generiert, die diese Bedingungen erfüllen. Eine solche Trajektorienschar ist exemplarisch in Abb. 48 dargestellt. Jede dieser generierten Trajektorien wird durch eine Kostenfunktion bewertet, um so die aktuell beste auszuwählen, die dann an den Antriebsstrang des Fahrzeuges übergeben wird.

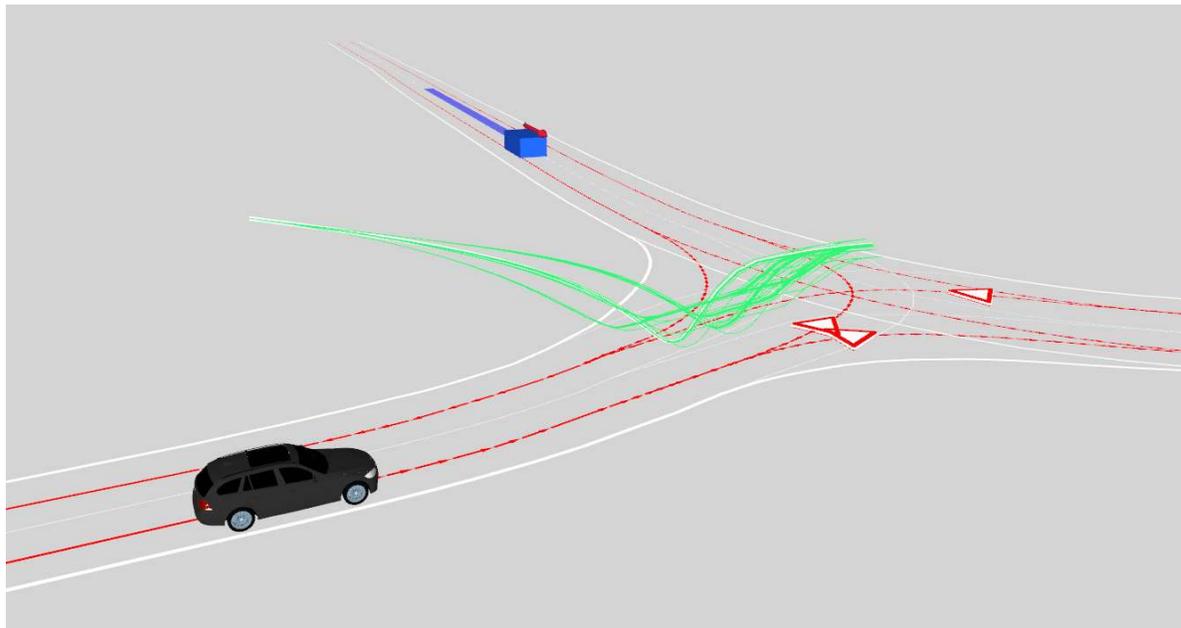


Abb. 48: Exemplarische Trajektorienschar, die versucht sich hinter dem kreuzenden Objekt einzufädeln. Die Höhe der Trajektorien zu einem bestimmten Zeitpunkt stellt die jeweilige Geschwindigkeit dar. Das EGO Fahrzeug wird folglich abbremsen, um nachdem das kreuzende Fahrzeug die Kreuzung überschritten hat, wieder zu beschleunigen, ohne dabei anhalten zu müssen.

Im Rahmen der kontinuierlichen Tests, Weiterentwicklungen und Optimierungen der Verhaltensplanung lief auch eine kontinuierliche Optimierung der zugehörigen Trajektorienplanung. Diese Optimierung wurde vor allem auf der BOSCH Teststrecke in Renningen durchgeführt und konnte zur Vorbereitung der Abschlussdemo verstärkt im Realverkehr von Ulm-Lehr getestet werden.

Bewegungsregelung

Die von der Trajektorienplanung übergebene Trajektorie wird vom Bewegungsregler umgesetzt. Hierzu wird ein bereits vorhandener Bewegungsregler mit entkoppelter Längs- und Querregelung verwendet (Abb. 49).

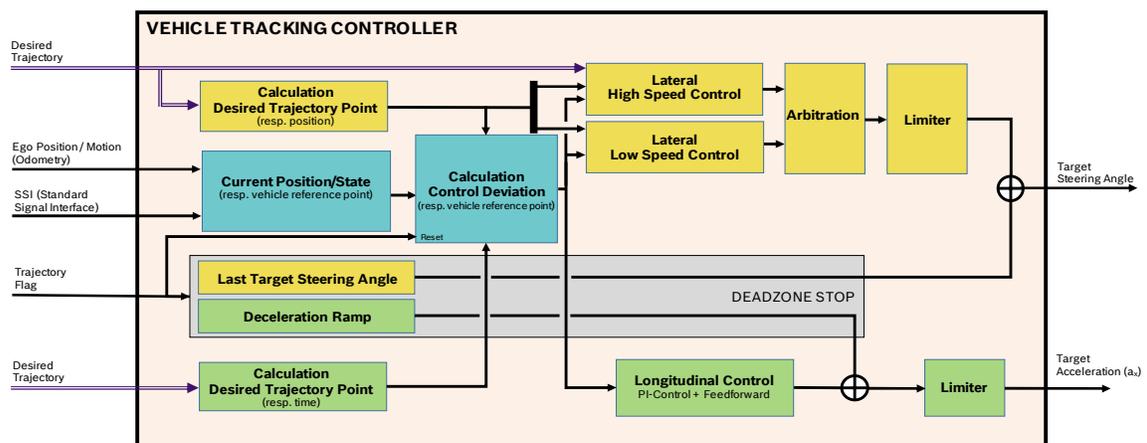


Abb. 49: Trajektorienfolgeregler

Schlussbericht - Robert Bosch GmbH

Um die hohen Dynamikanforderungen im urbanen Umfeld zu erfüllen, wurde die Längsregelung insoweit angepasst, dass die Anfahrtdynamik erhöht und die Anhaltegenauigkeit verbessert wurde.

6.4.7 Simulation

Um die zu entwickelnden Softwaremodule frühzeitig testen und evaluieren zu können, wurde eine Simulationsumgebung implementiert, die grob in zwei Bereiche unterteilt werden kann. Zum einen in die Simulation der durch das Mobilfunknetz übermittelten Infrastrukturdaten, um die fahrzeugeigene Sensordatenverarbeitung und Generierung eines erweiterten Umfeldmodells zu testen und zum anderen in die Simulation eines fahrzeugeigenen Umfeldmodells, um die implementierte Verhaltens- und Trajektorienplanung zu testen.

Für eine Überprüfung des fahrzeuginternen Signalfusses wurde in UAP6.3 ein prototypischer MEC-Server-Objektgenerator implementiert, der Objektdaten in dem im Konsortium vereinbarten Datenformat erstellt und weiterleitet. Die weitere Entwicklung der Simulationsumgebung beschäftigte sich hier mit der Erstellung von Objektdaten mit variabler Latenz und Genauigkeit, um einerseits das fahrzeugeigene Fusionssystem zu testen und andererseits genauere Aussagen über den Einfluss von Latenzzeiten auf ein solches System treffen zu können.

Für die Simulation des fahrzeugeigenen Umfeldmodells wurde ein Konzept erstellt, das es ermöglicht, Kartendaten einzubinden und Fahrzeuge, die sich entlang der Karte bewegen, zu simulieren. Im ersten Schritt wurden die Fahrzeuge als ideal, streng der Fahrspurmittellinie folgend, angenommen. Zusätzlich wurden alle potentiell möglichen zukünftigen Bewegungsverläufe inklusive der Interaktionen zu anderen Fahrzeugen über eine Wahrscheinlichkeitsverteilung dargestellt und in den einzelnen Bewegungsverläufen berücksichtigt.

Das erstellte Konzept zur Simulation des fahrzeugeigenen Umfeld-Modells wurde implementiert (Abb. 50) und zur Evaluierung bestehender Verfahren zur Verhaltensplanung eingesetzt. Hierfür wurde die in AP2 zur Verfügung gestellten und von BOSCH überarbeitete digitalen Karte (vgl. Abschnitt 6.2) in ein fahrzeugeigenes Format konvertiert und als Basis für die Bewegungsrichtungsschätzung zufällig generierter Objekte genutzt. Diese zufällig generierten Objekte sind idealisiert und bewegen sich entlang der Fahrspuren auf der digitalen Karte. Außerdem beachten sie die Vorfahrtsregeln und vermeiden Unfälle.

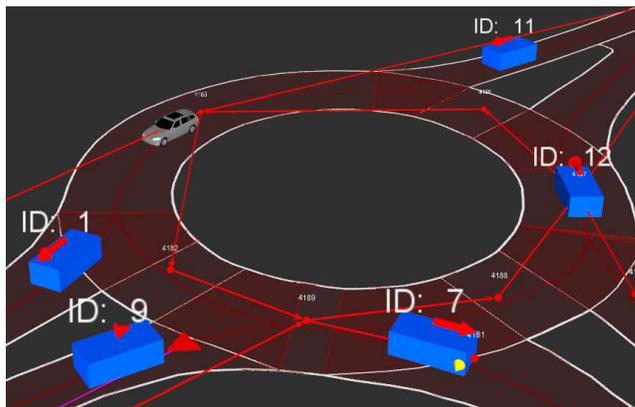


Abb. 50: Simulation eines Umfeldmodells auf Basis einer eingebundenen Karte

Des Weiteren wurde das Modul der Trajektorien-Planung in die Simulationsumgebung eingebunden, sodass auf Basis von simulierten Objekten und der darauf aufbauenden Verhaltensplanung auch eine entsprechende Trajektorie berechnet werden kann, die anschließend dem zusätzlich neu eingebundenen simulativen Fahrzeugregler übergeben wird. So können einzelne Verkehrssituationen erzeugt und hinsichtlich des Fahrverhaltens eines simulierten automatisierten Fahrzeuges evaluiert werden. Auf Grund des als unrealistisch einzustufenden Bewegungsprofils der simulierten Objekte entlang der Fahrspurmittellinie sind die simulativen Ergebnisse und Auswertungen verwendeter Verfahren nur bedingt aussagekräftig.

Schlussbericht - Robert Bosch GmbH

Als weiterer Schritt zur Unterstützung der Tests wurde zusammen mit dem Partner ITD eine dauerhafte Übertragung der MEC-Daten an einen BOSCH-Server in Betrieb genommen. Diese Daten sollen in Zukunft nach besonders relevanten und interessanten Szenen durchsucht und entsprechend katalogisiert werden. Dies ermöglicht zum einen die kontinuierliche simulative Evaluierung der Planungsalgorithmen gegen typische reale Szenarien, als auch die Identifizierung von atypischen Szenen und potentiellen Schwachstellen der Implementierung. In Vorbereitung auf diese Datenbasis wurden in der Simulation bereits die Voraussetzungen zur Integration der MEC-Daten geschaffen. Die aufgezeichneten Szenarien können wahlweise in einer open- oder closed-loop Simulation im Original oder unter Verwendung verschiedener Variationen wiedergegeben werden.

6.4.8 Vertrauensbildung durch Augmented Reality

Aufgrund der verzögerten Bereitstellung hinreichender Daten vom MEC-Server, die für die Entwicklung und Optimierung von Fusions- und Planungsalgorithmen notwendig waren, konnte ein Teil der geplanten Weiterentwicklung im AP 6 nicht im ursprünglichen geplanten Zeitraum geleistet werden. Dadurch wurden Kapazitäten frei, weitere für MEC-View relevante Fragestellungen zu betrachten, für die zu diesem Zeitpunkt keine MEC-Daten benötigt werden.

Eine sich bei der Einführung von automatisierten Fahrzeugen ergebende Fragestellung ist, wie die Akzeptanz bei Fahrgästen gesichert werden kann. Bei dem in MEC-View betrachteten Anwendungsfall verschärft sich diese Problematik noch dadurch, dass das Einfädeln auf eine erst aus geringer Entfernung einsehbare Vorfahrtsstraße umgesetzt wurde. Dies bedeutet, dass eine Regelung des Ego-Fahrzeugs auf für den Fahrgast nicht sichtbare Fahrzeuge stattfindet und Entscheidungen bezüglich der Trajektorienplanung für diesen nicht unmittelbar nachvollziehbar sind (Abb. 51). Dies kann von Fahrgästen bei einem Einfädelmanöver schnell als unangenehm empfunden werden.

Eine mögliche Lösung im Kontext von MEC-View ist, Fahrgästen ein Benutzerinterface mit einer Visualisierung des Umfelds, sowie der geplanten Trajektorien anzubieten. Dadurch werden diese über den durch die Infrastruktursensorik erweiterten Sichtbereich des Fahrzeugs sowie die darauf basierende Planung informiert. Augmented Reality, also die Erweiterung von physischer Umgebung mit räumlich integrierten virtuellen Informationen, ist eine dafür mögliche und geeignete Darstellungsmethode. Ein Fahrgast muss so nicht mehr eine Karte auf einem Bildschirm mit seiner Umgebung in Verbindung setzen, sondern erhält die relevanten Informationen in einer Einheit mit der physischen Umgebung präsentiert. Erreicht werden kann dieser Eindruck z.B. durch spezielle Brillen, die virtuelle Bilder perspektivisch korrekt in das Sichtfeld eines Trägers projizieren können.

Zur Umsetzung wurde eine Microsoft HoloLens als Augmented Reality Brille eingesetzt, da diese kabellos funktioniert und eine einfache Programmierung ermöglicht. Eine Anbindung an den zentralen Fahrzeugcomputer wurde über WLAN hergestellt. Über diese Schnittstelle wurde mehrmals pro Sekunde das jeweils aktuelle Umgebungsmodell sowie die geplante Trajektorie an die HoloLens übermittelt, die diese Daten dann entsprechend visualisierte.

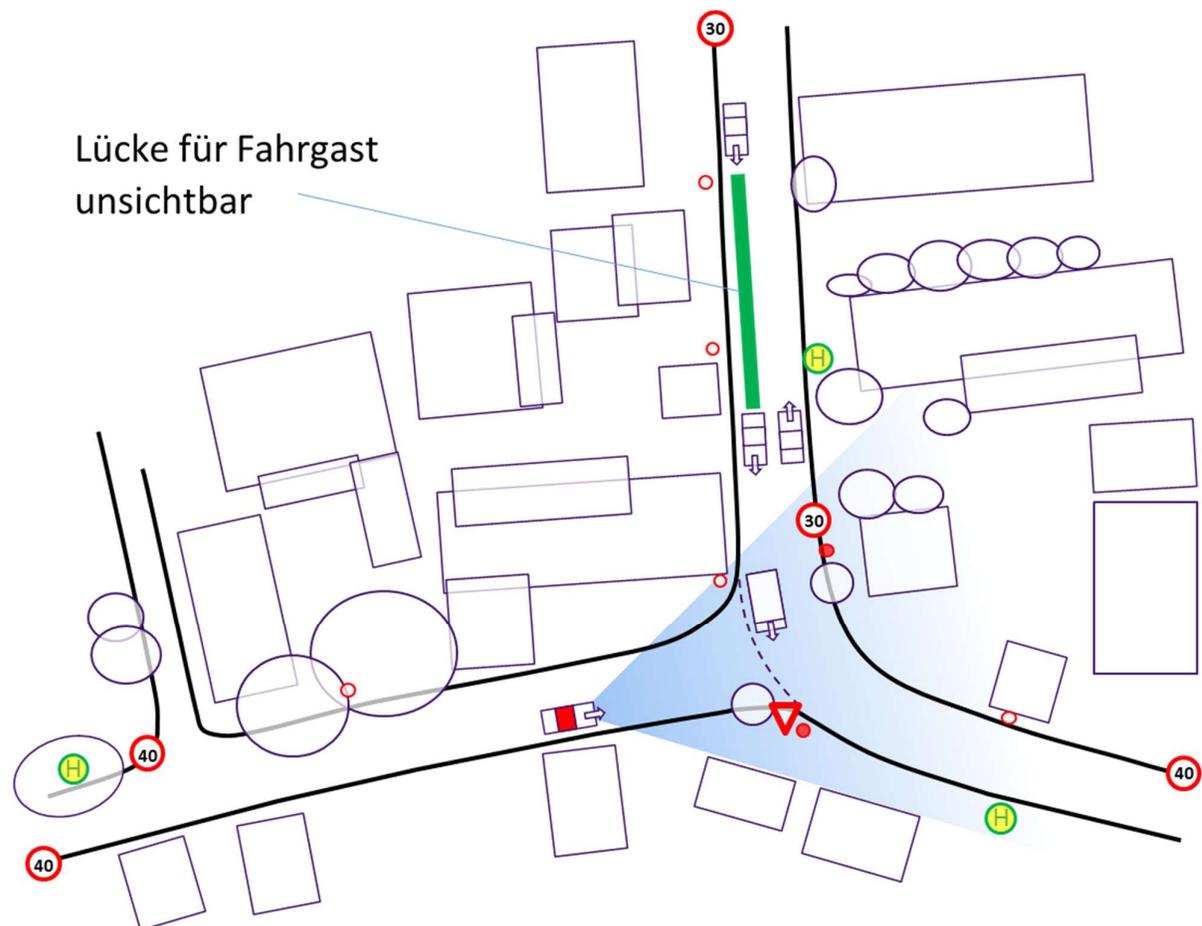


Abb. 51: Der Sichtbereich des Fahrgastes schließt die anzufahrende Lücke nicht ein und es ist daher für einen Fahrgast nicht erkennbar, worauf das Fahrzeug regelt

Die Nutzung von Augmented Reality wurde genauer erprobt, wobei im ersten Schritt drei Formen von grafischen Elementen betrachtet wurden (Abb. 52):

- Darstellung der erkannten Fahrzeuge: die erkannten Fahrzeuge werden durch oberhalb von ihnen eingeblendete Kegel markiert. Diese zeigen einem Fahrgast an, was das Ego-Fahrzeug erkennt und damit auch in die Planung einbezieht. Wenn eine Erkennung nur auf Basis von Daten des MEC-Servers erfolgt, so werden die Kegel als grün eingeblendet. Dies verdeutlicht dem Fahrgast, dass auch ein noch nicht für ihn sichtbares Fahrzeug schon mit in die Planung einbezogen wird.
- Darstellung einer Lücke zum Einfädeln: für ein geplantes Einfädelmanöver wird die Lücke angezeigt, die für das Manöver ausgewählt wurde. Dadurch ist für einen Fahrgast frühzeitig erkennbar, zwischen welchen zwei anderen Fahrzeugen das Ego-Fahrzeug plant auf die Querstraße aufzufahren. Durch Anzeige der Breite wird verdeutlicht, dass diese Lücke eine hinreichende Größe aufweist. Als Darstellung wird ein gelber Strich gewählt, der die Breite der Lücke perspektivisch korrekt darstellt. Anfang und Ende sind die Kegel der beiden Fahrzeuge, die die Lücke bilden.
- Darstellung der geplanten Trajektorie: die geplante Trajektorie wird vor dem Fahrgast auf die Straße gelegt, so dass er oder sie sehen kann, wie sich das Ego-Fahrzeug an welcher Stelle verhalten wird. Für die Darstellung wird eine Aneinanderreihung von Pfeilen gewählt, die zusammen die Form der Trajektorie ergeben. Dieses ermöglicht es einem Fahrgast, gleichzeitig die Bewegungsrichtung an verschiedenen Positionen zu erkennen sowie die gesamte Trajektorie zu erfassen.



Abb. 52: Die umgesetzte Visualisierung, wie sie durch eine HoloLens aussieht. Die Situation wurde in Renningen mit simulierten Daten erzeugt.

Eine erste Version des Systems wurde auf die vier Aspekte Nützlichkeit, Verständlichkeit, Design und Erhöhung des Vertrauens in einer Probandenstudie im Fahrzeug getestet (Abb. 53). Dieser fand jedoch nicht an der Testkreuzung in Ulm sondern in einem stehenden Fahrzeug in Renningen statt. Die Ergebnisse zeigen, dass alle drei Formen von grafischen Elementen positiv von Probanden aufgenommen wurden und die vier Aspekte als erfüllt wahrgenommen werden.

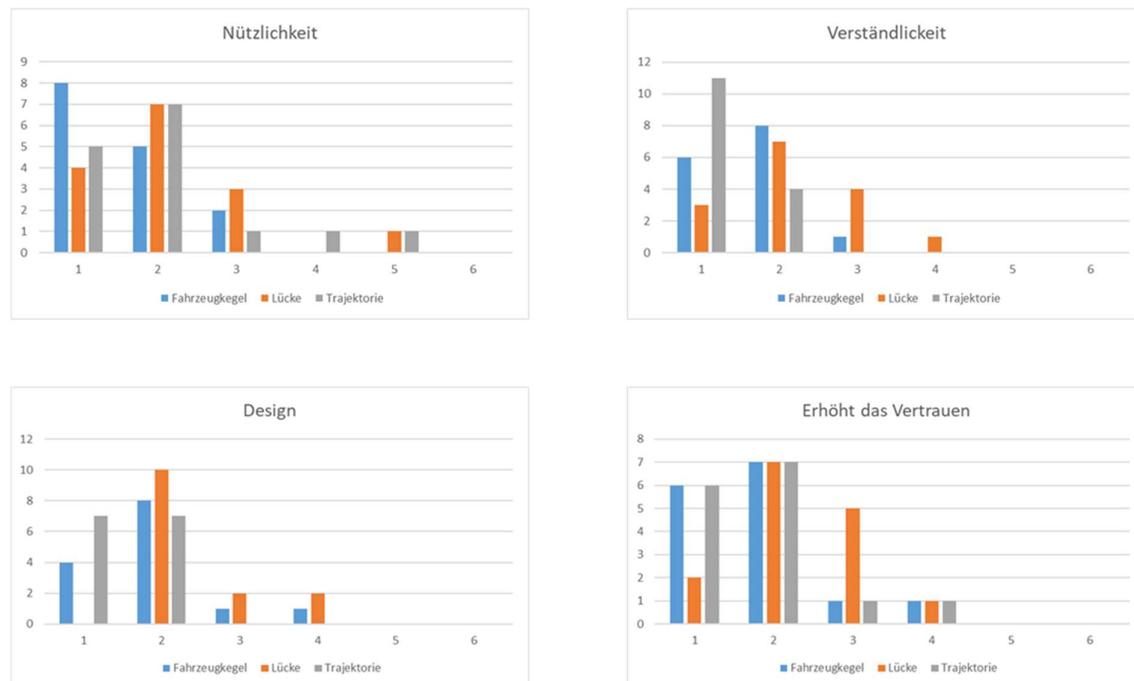


Abb. 53: Untersuchung auf die Aspekte Nützlichkeit, Verständlichkeit, Design und Erhöhung des Vertrauens (1 = sehr hoch bis 6 = sehr niedrig). Bei allen vier Aspekten zeigen die Bewertungen der Probanden die Erfüllung von diesem für die drei Formen von grafischen Elemente.

Aufbauend auf den vielversprechenden Ergebnissen der ersten Studie wurde das Nutzerinterfaces weiterentwickelt. Vorhandene Elemente wurden überarbeitet und neue hinzugefügt. Im Rahmen der Entwicklung wurden dabei folgende Elementen umgesetzt (Tab. 4):

Tab. 4: Auswahl verschiedener untersuchter HMI Elemente

Geplante Trajektorie



Die aktuell vom Fahrzeug geplante Trajektorie wird durch aneinandergereihte weiße Pfeile angezeigt, welche die Strecke markieren, die das Fahrzeug plant zu fahren.

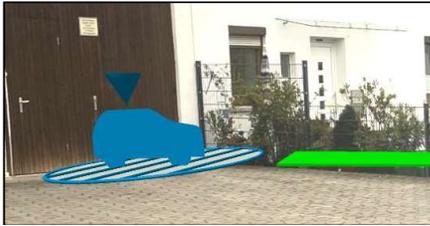
Sichtbare Fahrzeuge



Für den Passagier sichtbare Fahrzeuge werden mittels eines über dem jeweiligen Fahrzeug schwebenden Kegels markiert. So ist eine einfache Überprüfung möglich, dass alle sichtbaren Fahrzeuge auch erkannt wurden.

Schlussbericht - Robert Bosch GmbH

Verdeckte Fahrzeuge



Für den Passagier verdeckte Fahrzeuge (d.h. insbesondere Fahrzeuge die nur von der Infrastruktur erfasst und von dieser gemeldet wurden) werden als Fahrzeugsymbol dargestellt.

Lücke zwischen Fahrzeugen



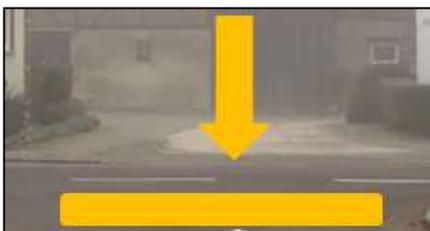
Eine Lücke, in die das Ego-Fahrzeug einfahren möchte, wird als grüner Bereich zwischen den beiden begrenzenden Fahrzeugen dargestellt.

Infrastrukturabdeckung



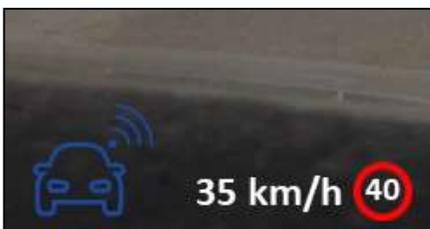
Oberhalb von Straßen mit einer Infrastruktur-Unterstützung durch einen MEC-Server werden Punkte dargestellt. Diese informieren den Passagier, dass auch verdeckte Fahrzeuge erkannt werden.

Stoppunkt



Über einen Stoppunkt wird einem Passagier angezeigt, wo das Ego-Fahrzeug beabsichtigt zu stoppen, z.B. um andere Fahrzeuge an einer Kreuzung vorzulassen.

Statusinformationen



Statusinformationen zeigen an, ob das Fahrzeug mit einem MEC-Server verbunden ist, welche Geschwindigkeit das Fahrzeug gerade hat und was die erlaubte Höchstgeschwindigkeit ist.

Schlussbericht - Robert Bosch GmbH

Mögliche Darstellungen des Nutzerinterfaces, in denen verschiedene Elemente kombiniert wurden, zeigt Abb. 54.

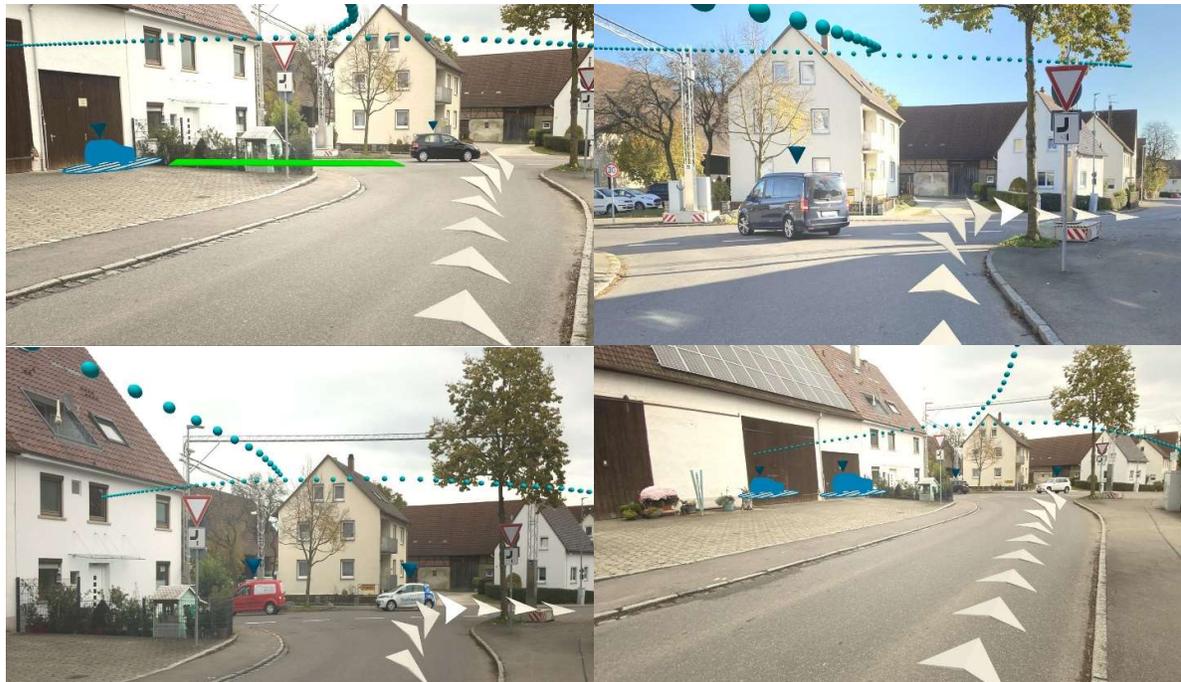


Abb. 54: Darstellung der Informationen mit Augmented-Reality an der Testkreuzung in Ulm-Lehr. Zu sehen sind die Trajektorie, Markierung sichtbarer wie unsichtbarer Fahrzeuge, die zur Einfahrt geplante Lücke sowie die Anzeige, an welchen Stellen der Straße Infrastrukturunterstützung zur Verfügung steht.

Um den Nutzen der Augmented-Reality-Anzeigeelemente belegen zu können, wurde im Rahmen von MEC-View eine Probandenstudie durchgeführt. Ziel war es zu ermitteln, welche Auswirkungen diese Form der Informationsanzeige auf Vertrauen in ein automatisiertes Fahrzeug hat. Vorab war bekannt, dass mit Augmented Reality eine Erhöhung des Vertrauens erreicht werden kann (Wintersberger et al., 2019, von Sawitzky et al, 2019). Daher standen insbesondere zwei Aspekte im Fokus. Diese waren die Bewertung der Auswirkung auf Vertrauen in infrastrukturunterstütztes automatisiertes Fahren bei einer für Passagiere nicht voll einseharen Situation sowie die Bewertung des Zusammenspiels der einzelnen Anzeigeelemente.

Für die Studie wurden drei Hypothesen formuliert, anhand derer jeweils die Relevanz verschiedener Arten von Augmented-Reality-Anzeigeelementen untersucht wurde:

- H1: Eine Anzeige aller möglichen Typen von Anzeigeelementen wird ein höheres Vertrauen zur Folge haben als eine Anzeige ohne Anzeigeelemente zu ortsgebundenen Informationen. (Fehlende Elemente: Infrastrukturabdeckung, MEC-Server Verbindungsanzeige)
- H2: Eine Anzeige aller möglichen Typen von Anzeigeelementen wird ein höheres Vertrauen zur Folge haben als eine Anzeige ohne Anzeigeelemente zur Fahrplanung. (Fehlende Elemente: Trajektorie, Lücke zwischen Fahrzeugen)
- H3: Eine Anzeige aller möglichen Typen von Anzeigeelementen wird ein höheres Vertrauen zur Folge haben als eine Anzeige ohne Anzeigeelemente zur Umfelderkennung. (Fehlende Elemente: Sichtbare und verdeckte Fahrzeuge)

Um eine reproduzierbare und sichere Testdurchführung zu gewährleisten, wurde die Studie in einem Fahrsimulator durchgeführt. Dazu wurden in Ulm-Lehr an der von MEC-View genutzten Kreuzung zwei Fahrten aufgenommen, von denen eine das einfache Abbiegen an der Kreuzung (Situation 1) und die andere das Einfädeln in eine Lücke zwischen zwei Fahrzeugen (Situation 2) darstellt. In keinem der beiden Fälle ist der

Schlussbericht - Robert Bosch GmbH

Querverkehr für den Passagier sichtbar und das Fahrzeug hält nicht an. Für jede der beiden Situation wurden dann jeweils vier verschiedene Kombinationen der Anzeigeelemente dargestellt, so dass jeder Proband insgesamt acht simulierte Fahrten in zufälliger Reihenfolge erlebte. Die angezeigten Elemente entsprachen dabei den drei Hypothesen zuzüglich einer vierten Variante mit allen Elementen. Die Untersuchung des Vertrauens der Probanden wurde Anhand des von Körber entwickelten Fragebogens mit den drei Dimensionen Kompetenz/Reliabilität, Verständlichkeit/Vorhersagbarkeit und Vertrauen durchgeführt (Körber, 2018). Insgesamt nahmen 18 Probanden teil, wobei von 17 die Untersuchungsergebnisse verwertbar waren.

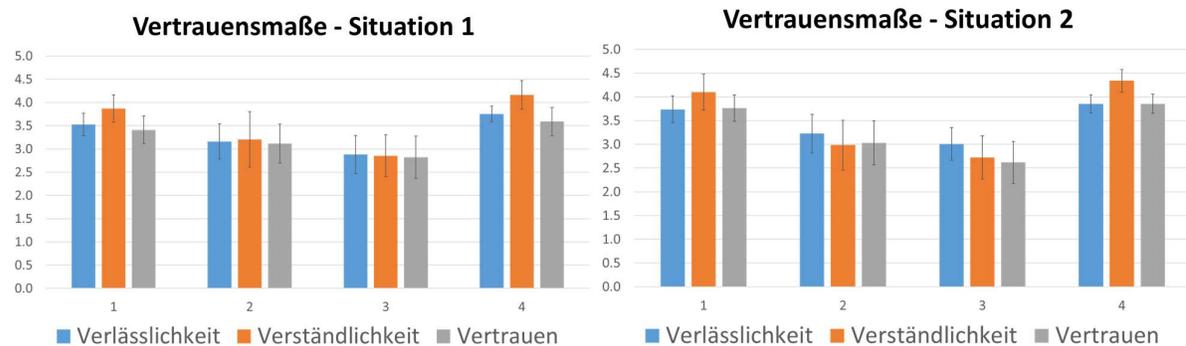


Abb. 55: Darstellung der Ergebnisse der Benutzerstudie. Situation 1 umfasst das Abbiegen an der Kreuzung ohne anzuhalten, Situation 2 das Abbiegen in eine Lücke. Bedingung 1 umfasst die volle Anzeige aller entworfenen Augmented-Reality-Elemente, Bedingung 2 umfasst alle Elemente außer denen, die Fahrentscheidungen anzeigen, Bedingung 3 umfasst alle Elemente außer denen, die Informationen zu erkannten Fahrzeugen anzeigen, und Bedingung 4 umfasst alle Elemente außer denen, die Informationen zur möglichen Infrastrukturunterstützung anzeigen.

Eine grafische Darstellung der Befragungsergebnisse findet sich in Abb. 55. Die Varianten 1-3 entsprechen den Kombinationen von Anzeigeelementen wie in den Hypothesen H1-H3 beschrieben. Die Variante 4 umfasst die Darstellung von allen möglichen Anzeigeelementen. Für die statistische Untersuchung der Ergebnisse wurde ein ANOVA mit anschließenden t-Test als post-hoc Tests genutzt. Eine Hypothese wurde dann akzeptiert, wenn für beide Situationen jeweils mindestens zwei der drei Indikatoren signifikant waren. Eine Auswertung, welche Hypothesen auf Basis der Untersuchungsergebnisse akzeptiert werden können, findet sich in Tab. 5:

Tab. 5: Auswertung der in der Probandenstudie zur Vertrauensbildung durch Augmented Reality überprüften Hypothesen

Auswertung zu H1	Situation 1 <ul style="list-style-type: none"> • Kompetenz/Reliabilität <input checked="" type="checkbox"/> • Verständlichkeit/ Vorhersagbarkeit <input checked="" type="checkbox"/> • Vertrauen (in Automation) <input checked="" type="checkbox"/> 	Folgerung H1 wird zurück gewiesen
	Situation 2 <ul style="list-style-type: none"> • Kompetenz/Reliabilität <input checked="" type="checkbox"/> • Verständlichkeit/ Vorhersagbarkeit <input checked="" type="checkbox"/> • Vertrauen (in Automation) <input checked="" type="checkbox"/> 	
Auswertung zu H2	Situation 1 <ul style="list-style-type: none"> • Kompetenz/Reliabilität <input checked="" type="checkbox"/> • Verständlichkeit/ Vorhersagbarkeit <input checked="" type="checkbox"/> • Vertrauen (in Automation) <input checked="" type="checkbox"/> 	Folgerung H2 wird akzeptiert
	Situation 2 <ul style="list-style-type: none"> • Kompetenz/Reliabilität <input checked="" type="checkbox"/> • Verständlichkeit/ Vorhersagbarkeit <input checked="" type="checkbox"/> • Vertrauen (in Automation) <input checked="" type="checkbox"/> 	

Auswertung zu H3	<p>Situation 1</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kompetenz/Reliabilität <input checked="" type="checkbox"/> • Verständlichkeit/ Vorhersagbarkeit <input checked="" type="checkbox"/> • Vertrauen (in Automation) <input checked="" type="checkbox"/> <p>Situation 2</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kompetenz/Reliabilität <input checked="" type="checkbox"/> • Verständlichkeit/ Vorhersagbarkeit <input checked="" type="checkbox"/> • Vertrauen (in Automation) <input checked="" type="checkbox"/> 	<p>Folgerung</p> <p>H3 wird akzeptiert</p>
-------------------------	---	---

Durch die Auswertung der Hypothesen lässt sich feststellen, dass sich Augmented Reality in dieser Studie als ein geeignetes Mittel erwiesen hat, Vertrauen in infrastrukturunterstütztes automatisiertes Fahren zu stärken. Dass H2 und H3 auf Basis der Untersuchungsergebnisse akzeptiert werden können, während dass bei H1 nicht der Fall ist, zeigt die Relevanz darzustellen, welche Informationen zur dynamischen Umgebung ein Fahrzeug hat und welche Fahrplanung es verfolgt.

7. Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Das Projekt MEC-View startete nach einer 2-stufigen Beantragungsphase (gemäß den Ausschreibungsrichtlinien) am 01.12.2016 und endete nach einer mittelneutralen Verlängerung um 6 Monate am 31.05.2020. Die mittelneutrale Verlängerung des Projektes wurde Anfang 2019 beantragt und nach Prüfung vom Fördergeber genehmigt. Wesentliche Ursache für die Verlängerung der Projektlaufzeit waren ungeplante Aufwände bei der Errichtung und Inbetriebnahme der Pilot-Anlage in Ulm-Lehr.

Der ursprünglich budgetierte Finanzrahmen konnte in der mittelneutralen Verlängerung ohne größere Abweichungen eingehalten werden. Der Projektfortschritt und die Mittelauslastung wurden von BOSCH in halbjährlichen Berichten dargelegt.

- Die größte finanzielle Position waren die Personalkosten zur Bearbeitung der MEC-View Arbeitspakete. BOSCH hat hier insgesamt ca. 1800 h Arbeitsstunden weniger als geplant (28000 h) aufgewendet. Die Gründe dafür liegen im Verzögerung des Aufbaus der Pilotanlage sowie in den COVID-19 bedingten Reise- und Versammlungsbeschränkungen in der Schlussphase des Projektes. So musste beispielsweise die Abschlusspräsentation in Ulm abgesagt werden. Auch geplante Verifikations-Test an der Pilotanlage in Ulm konnten im Zeitraum von März bis Ende Mai 2020 nicht mehr im geplanten Umfang durchgeführt werden.
- Die nächstgrößere Position waren die Sachmittel, z.B. für die Beschaffung von (BOSCH-) Video-Sensoren für die Infrastruktur an der Pilotanlage in Ulm-Lehr. Wie im Zwischenbericht für das zweite Halbjahr 2017 mitgeteilt, wurden die in AP4 geplanten Mittel für die Beschaffung von BOSCH-Sensoren nicht benötigt. Es wurden daher um 16000 € Materialkosten weniger abgerufen, als ursprünglich geplant.
- Schließlich sind Reisekosten zur Ermöglichung des fachlichen Austauschs mit den Verbundpartnern, sowie der Ergebnisverbreitung angefallen.

Details können dem zahlenmäßigen Verwendungsnachweis entnommen werden.

8. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Themenfeld "Automatisiertes Fahren" und insbesondere dessen Umsetzung in marktfähigen Produkten birgt in allen Teilaspekten erhebliche technisch-/wissenschaftliche wie auch wirtschaftliche Risiken. Diese Randbedingungen machen es selbst für große Automobilzulieferer schwer, grenzenlos in die Erforschung neuer innovativer Fahrerassistenzsysteme zu investieren. Die öffentliche Zuwendung ist notwendig, da die Partner des MEC-View Konsortiums das hohe Projektrisiko nicht aus eigener Kraft tragen können.

Für die Erfolgsabschätzung des in MEC-View erarbeiteten System-Ansatzes gibt es bisher nur mittelbare Annahmen, aber keine unmittelbaren Erfahrungswerte. Dies gilt insbesondere für den Bereich der Entwicklung von Infrastruktur-unterstützten automatisierten Fahrfunktionen, wie sie in MEC-View geplant und umgesetzt wurden. Ein solches Vorhaben ohne öffentliche Unterstützung ist aus unternehmerischer Gesichtspunkten außerordentlich riskant und muss unter betriebswirtschaftlichen Aspekten als kaum finanzierbar bewertet werden, obwohl die Erfolgsaussichten des Ansatzes aufgrund der Kompetenzen der beteiligten Projektpartner hoch und wohlbegründet sind. Die geplanten Arbeiten des Projekts MEC-View wären ohne staatliche Förderung in der vorgeschlagenen Form nicht oder nur deutlich verzögert in Angriff genommen worden. Die Gewährung der Fördermittel des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie ermöglicht somit eine deutlich frühere Erreichung der angestrebten Projektziele.

Die im Rahmen von MEC-View von der Robert Bosch GmbH geleisteten Arbeiten waren sowohl notwendig als auch angemessen, da sie der Planung nach Vorhabenbeschreibung entsprachen und zur Erfüllung der gesetzten Projekt- und Förder-Ziele notwendig waren. Der Erfolg des Vorhabens wurde weiterhin in zahlreichen Demonstrationen und Publikationen in renommierten Fachblättern, sowie Beiträge auf nationalen und internationalen Fachtagungen im Bereich des intelligenten Transports, des automatisierten Fahren und der Robotik belegt.



9. Voraussichtlicher Nutzen

Als einer der weltweit größten Zulieferer in den Geschäftsfeldern der Mobilitätslösungen setzt die Robert Bosch GmbH Schwerpunkte ihrer Arbeiten in der Erforschung, Entwicklung und Vermarktung von Komponenten (Sensoren, Aktuatoren), Gesamtsystemen (Advanced Driver Assistance Systems, Automatisierte Mobilität) als auch von Diensten (BOSCH Cloud, Vernetzte Mobilität) für das hoch- und vollautomatisierte Fahren (HAF). Zur Erschließung dieser Geschäftsfelder investiert BOSCH massiv in Erforschung und Entwicklung.

Am Projekt MEC-View beteiligten sich die Vorentwicklung des Geschäftsbereichs Chassis Systems Control (CC) und die zentrale Konzernforschung Corporate Research (CR) der Robert Bosch GmbH. Des Weiteren war die Konzerntochter Car Multimedia GmbH mit einem eigenen Antrag beteiligt. Die Zusammenarbeit zwischen zentraler Forschung und der CC-Vorentwicklung war sehr eng verzahnt. Die Team-Mitglieder beider Bereiche arbeiteten zusammen am Standort Renningen. So konnten die Ergebnisse des Projektes zur Weiterverwertung über die Vorentwicklung des Geschäftsbereiches CC direkt an die Produktentwicklungsbereiche weitergegeben werden. Insbesondere die in MEC-View geleisteten Entwicklungen der automatisierten Fahrfunktionen wurden in gemeinsamen Transferterminen an die Produktentwicklung Fahrerassistenz und Automatisiertes Fahren weitergegeben.

Für das fahrzeugseitige Umfeldmodell wurden schwerpunktmäßig Methoden zur Kombination von Daten aus verschiedenen Quellen, z.B. der Infrastruktur- und der Fahrzeugsensorik, transferiert. Diese Arbeiten umfassten Architekturen, die eine Nutzung von Umfeldinformationen aus mehreren Datenströmen, z.B. über mobile Datennetze von außerhalb des Fahrzeugs kommend, in einem kombinierten Umfeldmodell ermöglichen. Des Weiteren beinhaltet dies eine Auswahl und Bewertung von Algorithmen zur Kombination von Umfeldinformationen aus verschiedenen Quellen sowie Verfahren zur Ermittlung der benötigten Datenqualität in Bezug auf Latenz und Genauigkeit. Dazu kommen außerdem Verfahren zur Behandlung von „Out-Of-Sequence“ Messungen, wie sie im MEC-View Ansatz konzeptbedingt berücksichtigt werden mussten.

In MEC-View gesammelte Erkenntnisse zur Gesamtsystemauslegung für das vernetzte hochautomatisierte Fahren, sowie speziell Erkenntnisse zur Nutzung von Infrastruktur-Sensordaten zu diesem Zweck, haben im Geschäftsbereich CC Eingang in die Vorausentwicklung kommender Produktgeneration von vernetzten Fahrerassistenzsystemen gefunden. Auch hier war ein kontinuierlicher Transfer der in MEC-View erzielten Ergebnisse gegeben.

Die in MEC-View entwickelten Ansätze und Algorithmen für die Planung, unter eingeschränkter Sicht, sowie das synchronisierte Auffädeln auf eine vorfahrtsberechtigten Straße, wurde konzeptionell in verschiedene Serienprojekte transferiert und werden dort in der Serienentwicklung weiterverfolgt. Die algorithmischen MEC-View Ansätze kommen zum einen beim automatisiertem Auffahren auf eine Autobahn zum Tragen und werden zum anderen in ein Projekthaus transferiert, welches das vollautomatisierten Fahren in der Stadt anstrebt. Darüber hinaus wurden die entwickelten Algorithmen innerhalb der Konzernforschung in ein größeres Entwicklungsframework integriert, welches für die Untersuchung verschiedenster Fragestellungen im und um das automatisierte Fahren verwendet wird.

Insgesamt ist im Projektverlauf von MEC-View der zu erwartende wissenschaftliche und technische Erfolg eingetreten. Die Ergebnisse sind den entsprechenden Entwicklungsbereichen bei BOSCH kontinuierlich bekannt gemacht worden und im Zuge von Transfers in die Systementwicklung der Produktbereiche eingeflossen. Andere Erkenntnisse wurden in der firmeninternen Forschung weiter aufgegriffen und werden über die in MEC-View gesteckten Ziele hinaus, z.B. im BMWi-geförderten Folgeprojekt LUKAS, untersucht. Insgesamt verfügt BOSCH bezüglich der MEC-View Erkenntnisse über alle Voraussetzungen zur firmeninternen Verwertung auch in anderen Ländern und Regionen (z.B. APEC).

10. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Neben dem fachlichen Austausch mit den anderen Verbundpartnern wurde auch der Fortschritt von Wissenschaft und Technik außerhalb von MEC-View während der Projektlaufzeit kontinuierlich beobachtet und analysiert. Dies geschah einerseits im Rahmen von BOSCH-internen Veranstaltungen zum Austausch über wissenschaftlichen Themen und andererseits durch die Verfolgung der wissenschaftlichen Literatur über den hausinternen Bibliothekservice. Andererseits stellte BOSCH die eigenen, im Rahmen von MEC-View erfolgten Entwicklungen dem interessierten Fachpublikum auf verschiedenen Konferenzen vor und veröffentlichte mehrere wissenschaftliche Publikationen in Fachjournalen (Kapitel 11).

- Das Projekt wurde auf der BMWi und BMBF Fachtagung am 30. November 2017 bis 1. Dezember 2017 in Berlin dem deutschen Fachpublikum vorgestellt.
- Arbeitsschwerpunkte und erste Ergebnisse des Projektes wurden auf dem 25. ITS World Congress in Kopenhagen in einer von BOSCH geleiteten Schwerpunkt-Session zum vernetzten, automatisierten Fahren mit dem Fokus auf dem MEC-View Ansatz präsentiert.
- Das in MEC-View entwickelte Konzept zur Fusion von stark Latenz-behafteten Infrastruktur-Objekt-Daten mit den fahrzeugeigenen Objektdaten wurde auf der 21. International Conference on Information Fusion in Cambridge präsentiert.
- Details bzgl. dem Tracking von rechteckigen Objektboxen wurden auf dem 62. MPC Workshop in Furtwangen vorgestellt.
- Während des 30. IEEE Intelligent Vehicles Symposiums in Paris (IV 2019) wurde eine gemeinsam von der Universität Ulm und BOSCH entwickelte Zuverlässigkeitsschätzung für die Infrastruktur-Objekt-Daten präsentiert.
- Im Rahmen der 15. Robotics: Science and Systems (RSS) Konferenz in Freiburg im Breisgau wurden die entwickelten Planungsalgorithmen für das synchronisierte Auffädeln in die Vorfahrtsstraße detailliert vorgestellt. Dies beinhaltete neben der Vorstellung der Konzepte, auch eine detaillierte Evaluierung für verschiedene relevante Verkehrsszenarien.

Bei vielen dieser Veranstaltungen ergaben sich Diskussionen mit dem Fachpublikum, das reges Interesse an dem von BOSCH in MEC-View verfolgten Systemansatz zeigte. Es erwies sich in vielen Diskussionen, dass sowohl auf nationaler, besonders aber auf internationaler Ebene ähnliche Konzepte entwickelt und verfolgt werden. Insbesondere im APAC Wirtschaftsraum werden Infrastruktur basierte Umfeldsensoren, unterstützt durch performante Mobilfunknetze und Edge Server, in prototypischen, aber auch schon anwendungsnahen Systemen erprobt, um das automatisierte Fahren in städtischen Umgebungen zu unterstützen.

11. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Während der Projektlaufzeit von MEC-View wurden folgende Konferenzbeiträge und Publikationen unter direkter BOSCH Beteiligung erstellt, eingereicht und angenommen:

- Henn, R. W.: Mobile Edge Computing basierte Objekterkennung für hoch- und vollautomatisiertes Fahren (MEC-View). *BMW-BMBF –Fachtagung „Automatisiertes und vernetztes Fahren“*, **2017**
- Gabb, M.; Maier, M.; Müller, T.; Henn, R.-W.; Müller, J. & Buchholz, M.: Urban Automated Driving using Environment Perception as a Service. *ITS World Congress*, **2018**
- Gabb, M.: Edge Computing-based Fusion in the Project MEC-View. *Workshops of the International Conference on Information Fusion*, **2019**
- Gabb, M.; Digel, H.; Müller, T. & Henn, R.-W.: Infrastructure-Supported Perception and Track-Level Fusion Using Edge Computing. *Proc. Of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, **2019**
- Loshaj, B.; Batzies, E. & Gabb, M.: Circular Estimation for Rectangular Shape Tracking. *Proc. of the 2019 Furtwangen MPC Workshop*, **2019**
- Müller, J.; Gabb, M. & Buchholz, M.: A Subjective-Logic-Based Reliability Estimation Mechanism for Cooperative Information with Application to IVs Safety. *Proc. Of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, **2019**
- Völz, B.; Stamm, A.; Maier, M.; Henn, R.-W.; Siegart, R.; Nieto, J.: Towards Infrastructure-Supported Planning for Urban Automated Driving. *Robotics: Science and Systems – Workshop on Scene and Situation Understanding for Autonomous Driving*, **2019**
- Digel, H.; Gabb, M.; Erlinghagen, L.; Sax, E.: „Vehicle Localization Using Infrastrukture Sensing“. Akzeptiert zur Veröffentlichung in: *Intelligent System Solution for Auto Mobility and Beyond (AMAA)*, **2020**.
- Buchholz, M.; Müller, J.; Herrmann, M.; Strohbeck, J.; Völz, B.; Maier, M.; Henn, R.-W.: “Handling Occlusions in Automated Driving by Infrastructure Sensors: A V2X Approach with a MEC Server-based Environment Model” zur Veröffentlichung eingereicht in *IEEE Vehicular Technology Magazine, Special Issue on Recent Advances in Motion Control, Estimation and Diagnosis for Automated Vehicles*, **2020**

Abbildungen

Abb. 1: MEC-View Gesamtsystem-Architektur mit Subsystemen und Signalpfaden.....	14
Abb. 2: Anforderungsmatrix der MEC-View Subsysteme. Vier Teams erarbeiten die Anforderungen an und Schnittstellen zwischen den Subsystemen.....	15
Abb. 3: Schematische Darstellung des MEC-View-Use-case „Auffahren auf eine Vorfahrtstraße“ an der ausgewählten Pilotanlage.	16
Abb. 4: Signalfluss-Modell des MEC-View Systems	17
Abb. 5: KPI des Gesamtsystems ist die Gesamtsystem-Latenz. Darstellung in ms über Projektlaufzeit ab Q3/2018.....	18
Abb. 6: MEC-View Pilotanlage an der Kreuzung in Ulm-Lehr.....	19
Abb. 7: Automatisiertes Fahrzeug – Versuchsträger von BOSCH	21
Abb. 8: RBCM CCU	22
Abb. 9: Aufgenommener Kartenausschnitt im Testareal in Ulm-Lehr	23
Abb. 10: Erste Version der digitalen Karte (links) und deren manuelle Anpassungen im Kreuzungsbereich (rechts).....	24
Abb. 11: Angepasste digitale Karte der Testkreuzung und Umgebung im Stadtteil Ulm Lehr.	25
Abb. 12: Detaillierte Ansicht von drei angepassten Kreuzungen im Stadtgebiet Ulm Lehr.	25
Abb. 13: Schematische Darstellung der Lokalisierung mit Hilfe von Infrastruktursensorik. Der MEC-Server stellt dem Ego-Fahrzeug die getrackten Posen der Verkehrsteilnehmer und des Ego-Fahrzeugs im globalen MEC-Koordinatensystem (gelb) zur Verfügung. Das Ego-Fahrzeug trackt die Verkehrsteilnehmer im lokalen Fahrzeugkoordinatensystem (blau).	26
Abb. 14: Schematische Darstellung des Algorithmus zur Ego-Lokalisierung auf Basis von MEC-Daten. Aus [Digel2020]	27
Abb. 15: Exemplarisches Ergebnis der Infrastruktur-basierten Lokalisierung	28
Abb. 16: Abweichungen der Lokalisierung mit Realdaten. Histogramm der Abweichung. Schwarz: Angepasste Normalverteilung. Die Werte der angepassten Normalverteilung sind in Tab. 2 dargestellt	28
Abb. 17: Systemaufbau der Perzeption im AP6.3.....	29
Abb. 18: Vorabuntersuchungen zum robusten und genauen Fitting von Boxen in Sensordaten. Links: Objekthypothesen. Rechts: Finales Ergebnis.	30
Abb. 19: Die Normalverteilung (blau) vernachlässigt die Periodizität, wohingegen die Von-Mises-Verteilung (rot) diese berücksichtigt. Damit eignet sich diese zur Modellierung von Winkelungenauigkeiten. Aus [Loshaj2019].	30
Abb. 20: Allgemeines Strukturbild der fahrzeugeitigen Fusion, bestehend aus der lokalen Fusion der am Fahrzeug verbauten Sensoren, gefolgt von einer nachgelagerten Track-To-Track Fusion mit dem Infrastruktur-Umfeldmodell [Gabb2019].....	31
Abb. 21: Exemplarische Darstellung der Latenzproblematik	32
Abb. 22: Unscented-Transformation der Koordinatensysteme. In Rot die Sigmapunke, in Orange die Standardabweichung.	32
Abb. 23: Vereinfachtes Ablaufdiagramm für die Track-Level Daten-Assoziation.....	33
Abb. 24: Visualisierung unterschiedlicher Kovarianzellipsen eines Objektes. Blau und Gelb werden zu Grün fusioniert.....	33
Abb. 25: Umgebung für die simulationsbasierte Auswertung der vorgestellten Fusionsalgorithmen [Gabb2019].....	34
Abb. 26: Vergleich des mittleren quadratischen Fehlers verschiedener Fusionsalgorithmen [Gabb2019]....	34
Abb. 27: Standardabweichung des mittleren quadratischen Fehlers für die verschiedenen Fusionsalgorithmen [Gabb2019].....	35
Abb. 28: Verhältnis der Rauschmatrix-Determinanten [Gabb2019].....	36
Abb. 29: Systemarchitektur zur Einbettung der Planungskomponenten (Verhaltensplanung, Bewegungsplanung), sowie der verschiedenen Schnittstellen zu den benachbarten Komponenten: Perzeption, Lokalisierung, digitale Karte (Input), Regelung (Output) und dynamische Objektprädiktion.....	37
Abb. 30: Exemplarische Darstellung der Sichtbereiche eines automatisierten Fahrzeugs, mit und ohne Einbezug von Sichtbarkeitsinformationen der Infrastruktursensorik.....	39

Schlussbericht - Robert Bosch GmbH

Abb. 31: Sichtbarkeitsgrid: Konzept (links) und Realdaten (rechts).....	39
Abb. 32: Sichtbare (relevante) Fahrspuren: Konzept (links) und Realdaten (rechts).....	40
Abb. 33: Sichtbarkeitsabgleich aus gesehenen und notwendigen Fahrspuren: Konzept (links) und Realdaten (rechts).....	40
Abb. 34: Analyse, Identifikation und Auswahl von Lücken zwischen verschiedenen Fahrzeugen auf einer kreuzenden Vorfahrtsstraße. Die Kreuzungsgeometrie und Vorfahrtsregeln ist durch die HAF-Karte gegeben. Alle identifizierten Lücken sind in schwarz, die erreichbaren Lücken in grün und die ausgewählte Lücke in blau dargestellt. In diesem Zusammenhang bedeutet „erreichbar“, dass die Lücke mit normalen Fahrmanövern, begrenzt durch die kinodynamischen Beschränkungen (z.B. bezogen auf Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck), erreicht werden kann.....	42
Abb. 35: Beispiel eines Trajektorienbündels (grün) für eine ausgewählte Lücke (blau). Die Trajektorien sind in der z-Achse mit der geplanten Geschwindigkeit skaliert. Die ausgewählte Lücke definiert den Endpunkt aller Trajektorien als Kombination aus Position, Geschwindigkeit und Zeit. Zusammen mit dem Startpunkt, gegeben durch die aktuelle EGO-Position, können verschiedene Trajektorien mit verschiedenen Bewegungsprofilen definiert werden. Die Bewegungsprofile unterscheiden sich durch Brems- und Beschleunigungszeitpunkte, sowie maximale Geschwindigkeit und Beschleunigung. Zur Auswahl der finalen Trajektorie wird eine Kostenfunktion verwendet.....	42
Abb. 36: Evaluierte Situationen verschiedener Verkehrsdichte.....	43
Abb. 37: Fahrprofile für die oberen Situationen aus Abb. 36:	44
Abb. 38: Fahrprofile für unteren Situationen aus Abb. 36:	44
Abb. 39: Beispielszenario für die simulative KPI Auswertung.....	45
Abb. 40: Konzept für die Komponenten der dynamischen Objektprädiktion, unterteilt in die zwei Hauptblöcke: Intentionserkennung und Trajektorienprädiktion.....	46
Abb. 41: Netzstruktur: Convolutional Autoencoder.	48
Abb. 42: Exemplarischer Netzwerk In- und Output für die MEC-View Testkreuzung in Ulm.....	48
Abb. 43: Aktueller Netzwerk in- und output für die MEC-View Testkreuzung in Ulm.....	49
Abb. 44: Neuronales Netz zur Blinkerkennung. Eingang: Bild im Format 48*64 Pixeln mit 3 Farbkanälen; Ausgang: Klassifikation (links, rechts, aus); Netz: Das Netz besteht aus zwei Teilen: einer Vorverarbeitung durch ein convolutional neural network (zur Extraktion von Features aus dem Bild) und einer Erkennung des Blinkerstatus auf Basis eines rekurrenten Netzes (dieses enthält interne Speicher und ist entsprechend auf die Verarbeitung von Zeitreihen ausgelegt).....	50
Abb. 45: Konfusionsmatrix der Blinkerkennung. Initial ist bereits eine gute Unterscheidung zwischen den verschiedenen Klassen erkennbar. Außerdem ist gut ersichtlich, dass das Netzwerk sehr gut zwischen einem linken und rechten Blinker unterscheiden kann.	50
Abb. 46: Qualitatives Ergebnis der EGO-Pfadprädiktion für einen ~200m langen Straßenabschnitt. Die Spurmarkierungen sind in blau, der aktuell verwendete Referenzpfad in grün und der neu generierte realistischere Pfad in rot dargestellt. Das Ergebnis zeigt qualitativ das gewünschte Verhalten, wie z.B. schneiden von Kurven, anstatt Folgen einer definierten Mittellinie.	51
Abb. 47: Qualitative Pfadprädiktion für die Durchquerung eines Kreisverkehrs („gerade aus über den Kreisverkehr“). Spurmarkierungen in blau, Referenz-mittellinie in grün, realistischer Pfad in rot. Der prädizierte Pfad zeigt, dass erfolgreich menschliches Verhalten zum „Schneiden“ von Kurven gelernt wurde.	51
Abb. 48: Exemplarische Trajektorienschar, die versucht sich hinter dem kreuzenden Objekt einzufädeln. Die Höhe der Trajektorien zu einem bestimmten Zeitpunkt stellt die jeweilige Geschwindigkeit dar. Das EGO Fahrzeug wird folglich abbremsen, um nachdem das kreuzende Fahrzeug die Kreuzung überschritten hat, wieder zu beschleunigen, ohne dabei anhalten zu müssen.....	53
Abb. 49: Trajektorienfolgeregler.....	53
Abb. 50: Simulation eines Umfeldmodells auf Basis einer eingebundenen Karte.....	54
Abb. 51: Der Sichtbereich des Fahrgastes schließt die anzufahrende Lücke nicht ein und es ist daher für einen Fahrgast nicht erkennbar, worauf das Fahrzeug regelt.....	56
Abb. 52: Die umgesetzte Visualisierung, wie sie durch eine HoloLens aussieht. Die Situation wurde in Renningen mit simulierten Daten erzeugt.....	57

Schlussbericht - Robert Bosch GmbH

Abb. 53: Untersuchung auf die Aspekte Nützlichkeit, Verständlichkeit, Design und Erhöhung des Vertrauens (1 = sehr hoch bis 6 = sehr niedrig). Bei allen vier Aspekten zeigen die Bewertungen der Probanden die Erfüllung von diesem für die drei Formen von grafischen Elemente.....	58
Abb. 54: Darstellung der Informationen mit Augmented-Reality an der Testkreuzung in Ulm-Lehr. Zu sehen sind die Trajektorie, Markierung sichtbarer wie unsichtbarer Fahrzeuge, die zur Einfahrt geplante Lücke sowie die Anzeige, an welchen Stellen der Straße Infrastrukturunterstützung zur Verfügung steht.	60
Abb. 55: Darstellung der Ergebnisse der Benutzerstudie. Situation 1 umfasst das Abbiegen an der Kreuzung ohne anzuhalten, Situation 2 das Abbiegen in eine Lücke. Bedingung 1 umfasst die volle Anzeige aller entworfenen Augmented-Reality-Element, Bedingung 2 umfasst alle Elemente außer denen, die Fahrentscheidungen anzeigen, Bedingung 3 umfasst alle Elemente außer denen, die Informationen zu erkannten Fahrzeugen anzeigen, und Bedingung 4 umfasst alle Elemente außer denen, die Informationen zur möglichen Infrastrukturunterstützung anzeigen.	61



Tabellen

Tab. 1: In das automatisierte Fahrzeug integrierte Umfeld-Erfassungssensoren	21
Tab. 2: Abweichung der Lokalisierung mit Realdaten.....	29
Tab. 3: Auswertung des Erfolgs beim automatischen Auffädeln in eine Lücke zwischen Fahrzeugen auf einer vorfahrtsberechtigten Straße. Es wurde ein Basisszenario mit verschiedenen Parametrierungen und zufälligen Variationen in ~5300 eigenständigen Simulationsläufen bewertet.	46
Tab. 4: Auswahl verschiedener untersuchter HMI Elemente.....	58
Tab. 5: Auswertung der in der Probandenstudie zur Vertrauensbildung durch Augmented Reality überprüften Hypothesen.....	61



Literatur

Baumann, U.; Gläser, C.; Herman, M.; Zöllner, J. M. *Predicting Ego-Vehicle Paths from Environmental Observations with a Deep Neural Network*, IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2018

Körber, M. (2018, August). Theoretical considerations and development of a questionnaire to measure trust in automation. In *Congress of the International Ergonomics Association* (pp. 13-30). Springer, Cham.

von Sawitzky, T., Wintersberger, P., Riener, A., & Gabbard, J. L. (2019, June). Increasing trust in fully automated driving: route indication on an augmented reality head-up display. In *Proceedings of the 8th ACM International Symposium on Pervasive Displays* (pp. 1-7).

Wintersberger, P., Frison, A. K., Riener, A., & Sawitzky, T. V. (2019). Fostering user acceptance and trust in fully automated vehicles: Evaluating the potential of augmented reality. *PRESENCE: Virtual and Augmented Reality*, 27(1), 46-62.

Glossar

5G	Mobilfunkstandard fünfte Generation
AD	Automated Driving
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems - Fahrerassistenzsysteme
ADMA	Automotive Dynamic Motion Analyzer
AP	Arbeitspaket
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BOSCH	Robert Bosch GmbH
CCU	Communication Control Unit
CC	Chassis Systems Control – Geschäftsbereich des Unternehmensbereiches Bosch Mobility Solutions der Robert Bosch GmbH
CI	Covraince Intersection
Converge	Öffentlich gefördertes Projekt “Communication Network Vehicle Road Global Extension”
COVID	Coronavirus SARS-CoV-2
CR	Corporate Research – Zentrale Forschung der Robert Bosch GmbH
DAI	Daimler AG
DGPS	Differential Global Positioning System
EGO-Vehicle	Eigenfahrzeug
ENU	East-North-Up – Koordinatensystem
EU	Europäische Union
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCD	Floating Car Data
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GVB	Gesamtvorhabensbeschreibung des Projektes MEC-View
HAF	Hochautomatisiertes Fahren
HD-Karte	High-Definiton Karte
HW	Hardware
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEEE/RSJ	Bez. für International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)
IMAGinE	Intelligente Manöver Automatisierung - kooperative Gefahrenvermeidung in Echtzeit – BMWi gefördertes Verbundprojekt
IMF	Information Matrix Fusion
IMU	Inertial Measurement Unit
IROS	International Conference on Intelligent Robots and Systems
IT	Information Technology
ITD	IT Designers GmbH
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
Ko-HAF	Kooperatives Hochautomatisiertes Fahren
KPI	Key Performance Indicator
LiDAR	Light Detection and Ranging
LTE	Long Term Evolution (Mobilfunkstandard)
MEC	Mobile Edge Computing (nach ETSI Standard auch Multi-Access Edge Computing)
MEC-View	Verbundprojekt „Mobile Edge Computing basierte Objekterkennung für hoch- und vollautomatisiertes Fahren“
NKBF	Nebenbestimmungen für Zuwendungen auf Kostenbasis des Bundesministeriums für Bildung und Forschung an Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft für Forschungs- und Entwicklungsvorhaben
Nokia	Nokia Solutions and Networks GmbH & Co. KG



Schlussbericht - Robert Bosch GmbH

OEM	Original Equipment Manufacturer (Originalausrüstungshersteller)
OSPAT	Optimal Subpattern Assignment Metric for Tracks
OSRAM	OSRAM GmbH
RBCM	Robert Bosch Car Multimedia GmbH
simTD	Forschungsprojekt „Sichere Intelligente Mobilität - Testfeld Deutschland“
SAE	Society of Automotive Engineers
SPIES	Unterauftragnehmer von OSRAM, Ingenieurbüro Spies
SW	Software
T2T	Track-to-track
TOMTOM	TomTom Development Germany GmbH
HTRL	Technology Readyness Level
UAP	Unter-Arbeitspaket
UDE	Universität Duisburg-Essen, Institut für Physik von Transport und Verkehr
UR:BAN	BMWI-gefördertes Forschungsprojekt: Innovative Verkehrslösungen für die Stadt von morgen
UULM	Universität Ulm, Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik
V2X	Vehicle-to-Everything Communication

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel MEC-View Mobile Edge Computing basierte Objekterkennung für hoch- und vollautomatisiertes Fahren		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Digel, Holger Gabb, Michael Haug, Matthias Henn, Rüdiger W. Maier, Matthias Müller, Tobias Völz, Benjamin	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.05.2020	
	6. Veröffentlichungsdatum 30.11.2020	
	7. Form der Publikation Dokument	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Robert Bosch GmbH, Robert-Bosch-Platz 1, 70839 Gerlingen-Schillerhöhe	9. Ber. Nr. Durchführende Institution -	
	10. Förderkennzeichen 19A16010A	
	11. Seitenzahl 74	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 12	
	14. Tabellen 5	
	15. Abbildungen 55	
16. Zusätzliche Angaben -		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) TÜV Rheinland Consulting GmbH Am Grauen Stein 51105 Köln 30.11.2020		



Schlussbericht - Robert Bosch GmbH

18. Kurzfassung

Der vorliegende Schlussbericht zum Projekt MEC-View, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, fasst den Beitrag der Robert Bosch GmbH zusammen.

BOSCH hat sich im Projekt MEC-View zum Ziel gesetzt, die Leistungsfähigkeit infrastruktureitig verbauter Umfoldsensoren wie Videokameras und LiDAR-Sensoren für das hochautomatisierte Fahren (HAF) im urbanen Raum nutzbar zu machen. Aus der Anforderung, komplexe und herausfordernde Fahrsituationen zu beherrschen, ergibt sich die Notwendigkeit, eine infrastruktureitige Objektdetektion und -verarbeitung zu entwickeln und in Echtzeit mit der fahrzeugseitigen Umfeld-Wahrnehmung zu fusionieren. Hierfür halten vernetzte Sensoren Einzug in Infrastruktureinheiten des urbanen Raums wie z.B. in Straßenlaternen.

BOSCH griff im Projekt MEC-View diese Entwicklungen auf und entwickelte diese Ansätze nach Anforderungen des urbanen HAF weiter. Es wurde ein Mobile Edge Computing Netzwerk mit Server implementiert, welches Einzelbeobachtungen der vernetzten Infrastruktursensoren zu einem lokalen Umfeldmodell fusioniert und den HAF-Fahrzeugen zur Verfügung stellt. Die Gesamtarchitektur wurde anhand des Beispiels „Auffahren auf eine vorfahrtsberechtigten Straße“ prototypisch im realen Verkehr dargestellt und evaluiert.

Der vorliegende Bericht beschreibt die von der Robert Bosch GmbH in den MEC-View Arbeitspaketen erzielten Beiträge zur Bewältigung dieses Vorhabens und ergänzt den MEC-View Gesamtbericht der Verbundpartner.

19. Schlagwörter

Vernetztes automatisiertes Fahren, Verteilte Systeme, V2X, Infrastruktur-Sensoren, Mobile Edge Computing, LTE, 5G, Umgebungsmodell, Eigenlokalisierung, Sensordatenfusion, Fahrmanöverplanung

20. Verlag

–

21. Preis

–



Schlussbericht - Robert Bosch GmbH

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report	
3. title MEC-View Mobile Edge Computing basierte Objekterkennung für hoch- und vollautomatisiertes Fahren		
4. author(s) (family name, first name(s)) Digel, Holger Gabb, Michael Haug, Matthias Henn, Rüdiger W. Maier, Matthias Müller, Tobias Völz, Benjamin	5. end of project 31.05.2020	
	6. publication date 30.11.2020	
	7. form of publication Document	
	9. originator's report no. -	
8. performing organization(s) (name, address) Robert Bosch GmbH, Robert-Bosch-Platz 1, 70839 Gerlingen-Schillerhöhe	10. reference no. 19A16010A	
	11. no. of pages 74	
	13. no. of references 12	
12. sponsoring agency (name, address) Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) 10115 Berlin, Germany	14. no. of tables 5	
	15. no. of figures 55	
	16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) TÜV Rheinland Consulting GmbH Am Grauen Stein 51105 Köln 30.11.2020		



Schlussbericht - Robert Bosch GmbH

18. abstract

The current final report on the MEC-View project summarizes the contributions of the Robert Bosch GmbH. MEC-View was funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy.

Within the scope of the MEC-View project the Robert Bosch GmbH strives for the utilization of powerful road side sensing entities for the environmental scanning to support highly automated driving in urban areas (characterized by peripheral development and stationary objects, which occlude relevant road users). For this purpose the MEC-View partners employed LiDAR and Video camera sensor systems at traffic lights at the MEC-View test area in Ulm-Lehr.

The challenging requirements of complex urban driving situations towards the perception of highly automated driving systems demand the online real-time detection and classification of all relevant objects and road users of the local environment. To meet this requirement in the urban traffic situation, the object data of the road side sensing units are primary consolidated in an accurate local environment model, which is hosted at a mobile edge computing (MEC) server. The resulting environment model with object information and features are subsequently transferred to the AD vehicle and are merged within the on-board perception.

This MEC-View approach was implemented by means of a mobile edge computing network including a MEC-server and a high-performance LTE/5G mobile network to connect the infrastructure based sensing units and the MEC-server to the highly automated vehicles. The overall system architecture sketched above was implemented, tested and evaluated in a real traffic situation by means of the prototype use case “seamlessly entering a priority road”.

19. keywords

Connected automated driving, Distributed Systems, V2X, Road Side Sensing, Mobile Edge Computing, LTE, 5G, Environment Model, Localization, Sensor Data Fusion, Driving Maneuver Planning.

20. publisher

21. price