

# Abschlussbericht<sup>1</sup>

für das FuE-Verbundprojekt



## **Durchgehende Unterstützung vernetzten und automatisierten Fahrens im Mischverkehr mit heterogen ausgestatteten Fahrzeugen – Digitales Testfeld Dresden –**

im Rahmen der BMVI-Förderrichtlinie

„Automatisiertes und vernetztes Fahren auf digitalen Testfeldern in Deutschland“

<b>Verbundprojektleitung</b>	Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI <sup>2</sup>
<b>Weitere Verbundpartner:</b>	BMW AG IAV GmbH Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr MUGLER AG Noritel Mobile Kommunikation GmbH Preh Car Connect GmbH Vodafone GmbH IVM Institut für Vernetzte Mobilität gGmbH Technische Universität Chemnitz Technische Universität Dresden
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b>	01.04.2017 – 31.03.2020
<b>Förderkennzeichen:</b>	16AVF1024
<b>Autoren</b>	Tim Alscher, Thomas Anders, Rico Auerswald, Claudia Bomholt-Holl, Ansgar Dietermann, Lars Franke, Sven Grunwald, Mario Krumnow, Mathias Haberjahn, Falk Hanisch, Isabel Kreißig, Josef F. Krems, Steffen Kutter, Sven Lorenz, Thomas Otto, Sabine Springer

---

<sup>1</sup> Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird im Bericht das generische Maskulinum verwendet. Sämtliche Bezeichnungen gelten für alle Geschlechter.

<sup>2</sup> 2017-2018: BMW AG – Die administrative Projektleitung lag für die gesamte Laufzeit bei Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI

## Inhaltsverzeichnis

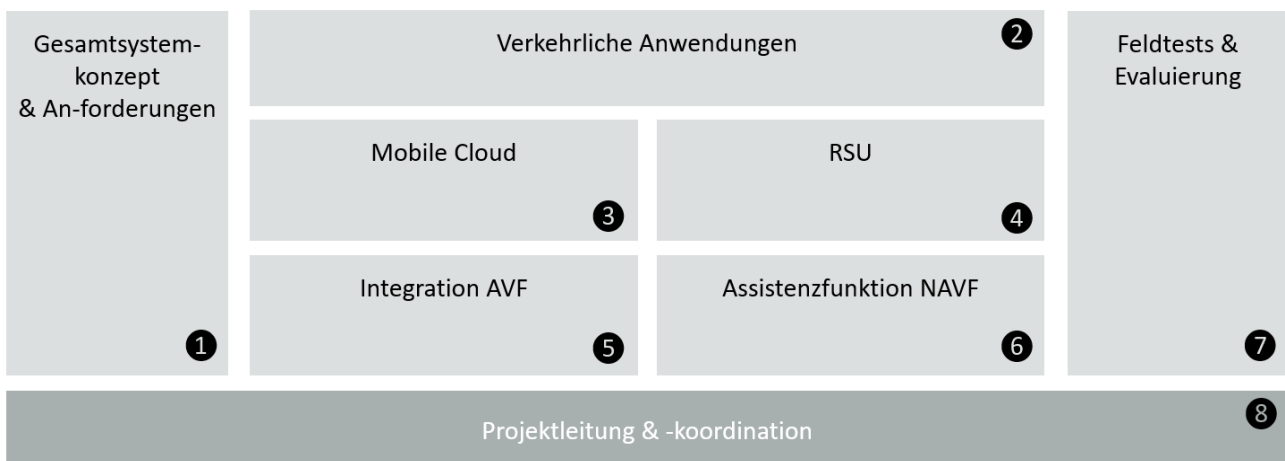
<b>1</b>	<b>Management Summary</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Ergebnisse des Projekts</b>	<b>1</b>
2.1	Gesamtsystemkonzept & Anforderungen (AP 1)	2
2.2	Verkehrliche Anwendungen (AP 2)	4
2.3	Mobile Cloud (AP 3)	9
2.4	RSU (AP 4)	13
2.5	Integration VAVF (AP 5)	17
2.6	Assistenzfunktionen für NAVF (AP 6)	22
2.7	Feldtests & Evaluierung (AP 7)	27
<b>3</b>	<b>Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung</b>	<b>34</b>
<b>4</b>	<b>Erreichung der Projektziele</b>	<b>35</b>
<b>5</b>	<b>FE-Ergebnisse von dritter Seite</b>	<b>35</b>
<b>6</b>	<b>Öffentlichkeitswirksame Maßnahmen</b>	<b>35</b>
<b>7</b>	<b>References</b>	<b>39</b>

## 1 Management Summary

In HarmonizeDD entstanden neuartige Funktionen zur Unterstützung automatisierter sowie konventioneller Fahrzeuge in innerstädtischen Bereichen, die dazu beitragen, wechselseitige Störeinflüsse und Informationsunterschiede zu vermeiden. Diese Funktionen basieren auf einer Mobile Cloud zur flächendeckenden Bereitstellung von Basisdiensten sowie auf lokalen Roadside Units mit erweitertem Funktionsumfang auf bestimmten Strecken. Erweiterte Funktionen für das automatisierte Fahren und neue Assistenzfunktionen für konventionelle Fahrzeuge, welche die Interaktion im Mischverkehr verbessern, wirken dabei nahtlos zusammen. Durch einen komplementären Einsatz von unterschiedlichen Kommunikationstechnologien wurde einerseits mit Blick auf einen zukünftigen Regelbetrieb ein unmittelbarer Nutzen für viele Verkehrsteilnehmer erreicht. Andererseits ließen sich damit innovative Ansätze zur Einbettung automatisierter Fahrzeuge in den Verkehrsfluss realisieren, die erhöhte Anforderungen an die Kommunikation stellen und das Potential und die Anwendungsreife der Technologien aufzeigen. Die entwickelten Ansätze wurden im Digitalen Testfeld Dresden experimentell untersucht, um daraus Schlussfolgerungen für den Ausbau zukünftiger verkehrstechnischer und kommunikationsseitiger urbaner Infrastrukturen abzuleiten.

## 2 Ergebnisse des Projekts

Die Darstellung der Projektergebnisse in diesem Abschnitt ist in sieben fachliche Arbeitspakete gegliedert, welche sich entsprechend Abbildung 1 zusammensetzen.



**Abbildung 1: Projektstruktur HarmonizeDD** (© Fraunhofer IVI)

Dabei bildeten AP 1 mit der Definition des Gesamtsystems inklusive der Spezifikation der Anforderungen sowie AP 7 mit der Durchführung von Feldtests und deren Evaluierung den Rahmen der technischen Entwicklungen und Umsetzung der Projektziele.

In AP 2 wurden die verkehrlichen Anwendungen definiert und in enger Abstimmung mit den Anforderungen bzgl. des definierten Gesamtsystems aus AP 1 beschrieben sowie spezifiziert. Hierbei wurden Abhängigkeiten von Funktionsblöcken sowie von Kommunikationsabläufen identifiziert, welche die Grundlage für die weiteren

Arbeitspakete bildeten. Die wesentlichen Ergebnisse aus AP 1 und AP 2 sind die Systemspezifikation bzw. die Definition der Use Cases [2, 3]. Darüber hinaus wurden Anforderungen bzgl. der Kommunikation, der Fahrfunktionen und des HMIs ermittelt, welche die Grundlage der Entwicklungsarbeiten bildeten [4-6].

Die infrastrukturseitigen Funktionen der Mobile Cloud und der Roadside Unit (RSU) sowie deren Schnittstellen zum Ressourcenmanagement und C-ITS Backend REMAS, zum Verkehrsmanagementsystem VAMOS (VMS) bzw. zur Lichtsignalanlage (LSA) wurden in AP 3 und AP 4 ausgearbeitet. Auch auf die Integration der entsprechenden Kommunikationstechnologien (Mobilfunk, IEEE 802.11p, Cellular-V2X) wurde sich in diesen beiden Arbeitspaketen fokussiert. Die wichtigsten Ergebnisse sind hierbei die Umsetzung der Komponenten Mobile-Cloud und RSU als Plattform zur Integration von infrastrukturseitigen Applikationen, die Entwicklung der Applikationen selbst sowie die Definition und Implementierung der Schnittstellen zu REMAS und VAMOS. Weiterhin konnte über die Bereitstellung des GeoMessaging Services die Mobile Cloud sowohl mit den verteilten RSUs als auch mit den Fahrzeugen vernetzt werden. Es wurden die Kommunikationstechnologien Mobilfunk und IEEE 802.11p in das System integriert. Die Technologie Cellular-V2X wurde mit ersten auf dem Markt verfügbaren Hardware-Prototypen getestet.

Die Entwicklung bzw. Integration von Funktionen bzgl. des vollautomatisierten vernetzten Fahrzeugs (VAVF) ist in AP 5, die des nicht-automatisierten vernetzten Fahrzeugs (NAVF) in AP 6 durchgeführt worden. Als wichtigste Ergebnisse wurde in AP 5 das VAVF ertüchtigt, die in AP 2 ausgewählten Use Cases im hochautomatisierten Fahrprozess simulativ bzw. real zu applizieren, zu testen zu und demonstrieren. In AP 6 wurden insbesondere die Entwicklung und Visualisierung der Assistenzfunktionen mittels HMI und Head-Up Display (HUD) umgesetzt.

Als administratives Arbeitspaket fungierte AP 8 für die Projektleitung (BMW) und -koordination (Fraunhofer IVI), u.a. mit den Aufgaben der übergeordneten Organisation von Projekttreffen sowie externen Präsentationen.

## 2.1 Gesamtsystemkonzept & Anforderungen (AP 1)

Im Rahmen von AP 1 wurde das **Gesamtsystem** mit seinen spezifischen **Anforderungen** definiert. Das Konzept wurde federführend von Fraunhofer IVI und BMW in Zusammenarbeit mit allen Partnern erarbeitet. Eine Darstellung des Gesamtsystems ist Abbildung 2 zu entnehmen.

Im Ergebnis entstand die technische Spezifikation des Gesamtsystems, die sowohl die Use Cases und Anwendungen, als auch die verkehrs-, informations- und kommunikationstechnischen Teile umfasst. Die Schnittstellen hinsichtlich der Querbezüge der Komponenten der Subsysteme sowie deren Anforderungen im Gesamtsystem wurden analysiert und definiert. Basierend auf den Subsystemen haben die Projektpartner für jede in HarmonizeDD definierte verkehrliche Anwendung eine physikalisch-funktionale sowie eine dynamische Beschreibung mit den benötigten Funktionen der einzelnen Subsysteme erarbeitet. Hierbei wurden bereits die Anforderungen der Subsysteme Mobile Cloud, RSU, Central Cloud, VAVF sowie NAVF inkl. der Nutzer-Anforderung an die Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) spezifiziert und berücksichtigt. Neben der verkehrlichen, informations- und kommunikationstechnischen Perspektive erfolgte die Systemdefinition aus MMI- und Nutzer-Perspektive. IVM erarbeitete eine Identifikation der marktseitigen und kundenseitigen Anforderungen ans das Gesamtsystem.

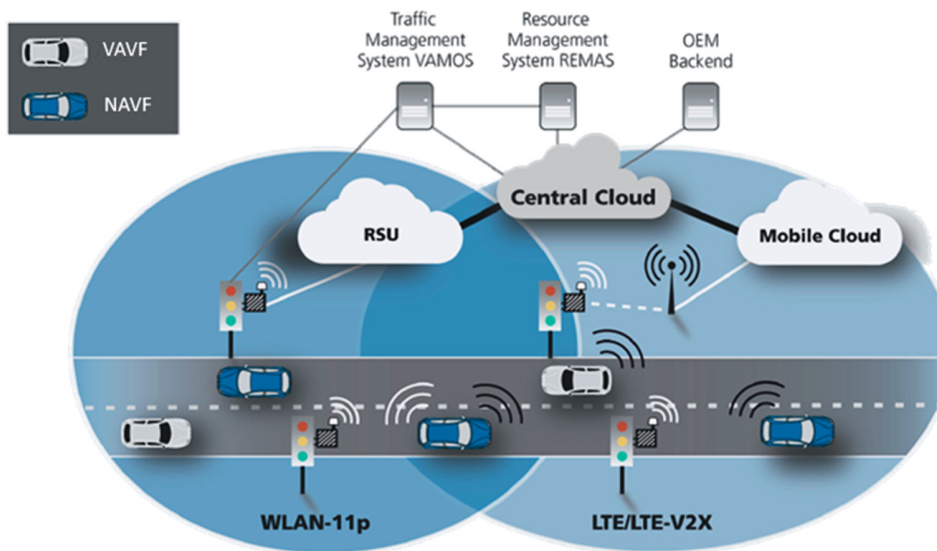


Abbildung 2: Darstellung des Gesamtsystemkonzepts (© Fraunhofer IVI)

Das **Kommunikationssystem** wurde von Fraunhofer IVI in Zusammenarbeit mit Vodafone, MUGLER und IVM mit den Technologien WLAN-11p, C-V2X (LTE-V2X) sowie GeoMessaging (LTE) spezifiziert. Hierbei wurde u.a. festgelegt, dass die V2X-Nachrichten und Protokolle über alle drei Kommunikationspfade gleichermaßen genutzt werden und für die ITS-Applikationen transparent sind. Diese Festlegung wurde aus den verkehrlichen Anforderungen abgeleitet und erlaubt einen flexiblen Einsatz der drei Technologien [7].

Die Spezifikation der **Mobile Cloud** und der **C-ITS Backend** (Central Cloud) wurde von Fraunhofer IVI erarbeitet sowie gemeinsam mit Vodafone die Schnittstelle zum GeoMessaging-Server spezifiziert. Fraunhofer IVI übernahm die Definition der Anbindung an REMAS, TU Dresden VLP die Schnittstelle zum Verkehrsmanagementsystem (VMS) VAMOS. Die Spezifikation der **RSU** mit ihren Schnittstellen wurde von Fraunhofer IVI, MUGLER und IVM gemeinsam erarbeitet.

Die Anforderungen an die Fahrzeugarchitektur bzw. die notwendigen Fahrfunktionen des **VAVF** wurden von der IAV in Zusammenarbeit mit BMW und TU Dresden FZM abgeleitet. Als Grundlage dienten die Ergebnisse aus AP 2. Im Vordergrund standen elementare Funktionen wie beispielsweise eine generische Kommunikationsschnittstelle für das bereits existierende AD (Automated Driving) System. Des Weiteren wurden Anforderungen an die sensortechnische Ausstattung der VAVF ermittelt.

Die Definition des fahrzeugseitigen Subsystems und die Profile für die **NAVF** wurden von Preh Car Connect, Noritel, Fraunhofer IVI und der TU Chemnitz erarbeitet. Für die Erfassung nutzerseitiger Anforderungen wurden von der TU Chemnitz vorab Literaturrecherchen durchgeführt. Konkrete Veröffentlichungen zu **Mensch-Maschine-Interaktion (MMI)** für den Kontext des vernetzten urbanen Mischverkehrs, bestehend aus Fahrzeugen unterschiedlicher Automatisierungsstufen, waren zu diesem Zeitpunkt rar. Die Rechercheergebnisse umfassten generische Design- und Usability-Kriterien für qualitative (z.B. Ort und Zeitpunkt der Informationsdarbietung) und quantitative (z.B. Präsentationswinkel für visuelle Informationsdarbietung) Anforderungen an Mensch-Maschine-Schnittstellen. Für die Entwicklung eines Human-Machine-Interface (HMI), welches die Anforderungen

von Teilnehmern des vernetzten urbanen Mischverkehrs erfüllt, erfolgte eine enge Orientierung am nutzerzentrierten Entwicklungsprozess [8].

Für die **simulative Analyse** der in AP 2 ausgewählten Use Cases wurde von TU Dresden FZM die Konzeptionierung des Simulations-Frameworks und der Partitionierung der definierten Use Cases erstellt. Es wurden dabei praktische Untersuchungen zur Ermittlung eines sinnvollen Parameterraumes für die Simulation der Fahrmanöver durchgeführt. Weiterführend erfolgte eine Bewertung der schematischen Fahrmanöver aus energetischer Sicht. Der Fokus wurde auf die Abbildung und Anbindung der notwendigen Steuerungsalgorithmen gelegt, sodass auch komplexe Manöver virtuell abbildbar und bewertbar waren. Die Simulationsergebnisse bildeten einen essentiellen Baustein für die Auslegung und Betrachtung des gesamtheitlichen Projektzieles, sowie für die projektpartnerspezifische Auslegung der Versuchsträger für die Feldtests und Evaluierung in AP 7.

## 2.2 Verkehrliche Anwendungen (AP 2)

Die wesentlichen Ergebnisse des AP 2 waren die Spezifikation von Anwendungsfällen aus Sicht der Verkehrsteilnehmer, insbesondere hinsichtlich spezieller Fahrmanöver für VAVF im Mischverkehr sowie neuartiger individueller Dienste für NAVF. Als Komplettierung der Gesamtsystemspezifikation aus AP 1 wurden für Interaktionsszenarien dynamische Beschreibungen der Use Cases erarbeitet.

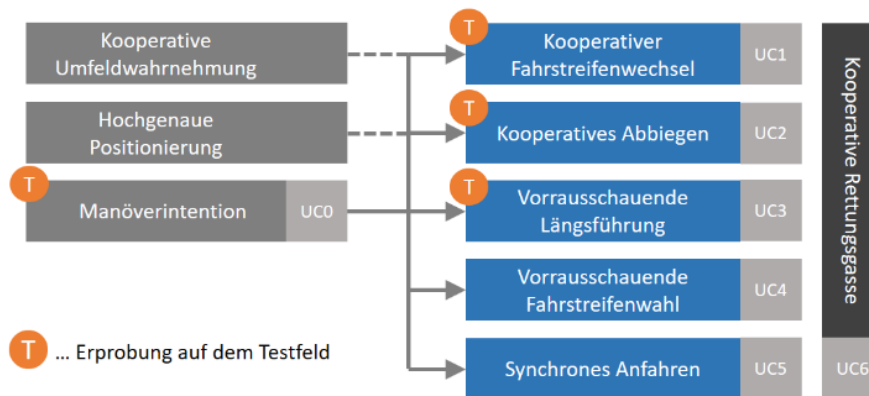
Die zentralen Arbeitsschritte zum Erreichen der nachfolgend beschriebenen Ergebnisse waren:

- Anwendungsfälle (BMW, IAV, Fraunhofer IVI, TU Chemnitz, TU Dresden VLP)
- Interaktionsszenarien & Kommunikationsprozesse (BMW, Fraunhofer IVI, TU Chemnitz, TU Dresden VLP)

Unter der Federführung von Fraunhofer IVI wurden im ersten Schritt die verkehrlichen **Anwendungsfälle** definiert, insbesondere mit dem Ziel, einen Teil dieser Use Cases (UC) auf dem Digitalen Testfeld Dresden im urbanen Raum zu erproben. Im Vordergrund der verkehrlichen Anwendungen standen Erkenntnisse in Bezug auf Mischverkehrsszenarien aus Sicht der Verkehrsteilnehmer, insbesondere der Unterstützung von VAVF-Entscheidungsprozessen sowie von Diensten und Assistenzfunktionen des NAVF. Bei der Auswahl kam ein Bewertungsprozess zum Einsatz, welcher vom Projektpartner IVM im Rahmen von AP 1 ausgearbeitet und evaluiert wurde. Dazu wurden zunächst in einem Workshop mit allen Projektpartnern konkrete Anwendungsszenarien systematisch identifiziert und beschrieben. Es wurde ein Fragebogen zur Bewertung der Use Case Alternativen entwickelt und ausgewertet. Die Use Cases wurden von den Projektpartnern anhand verschiedener technischer Aspekte (Umsetzbarkeit, Innovationspotential etc.) und wirtschaftlicher Fragestellungen (Relevanz und Mehrwert für das eigene Unternehmen etc.) bewertet. Als Ergebnis des Prozesses wurden die fünf in Abbildung 3 dargestellten verkehrlichen Anwendungsfälle UC1 bis UC5 definiert und ausgewählt.

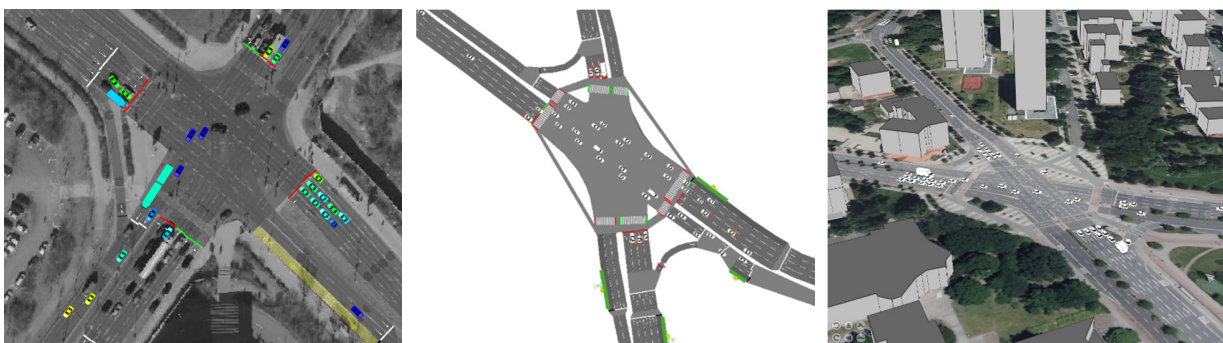
Insbesondere durch die praktische Expertise von BMW und IAV auf Seite der VAVF sowie von Fraunhofer IVI auf Seite der vernetzten Verkehrsinfrastruktur, konnten die Use Cases UC1 bis UC5 hinsichtlich der automatisiert- vernetzten Fahrstrategie des VAVF inkl. der darunterliegenden Entscheidungsmechanismen kategorisiert und mit der Rahmenanwendung „Kooperative Rettungsgasse“ beispielhaft durchdrungen werden. Neben den verkehrlichen Anwendungen wurden die drei weiteren Basis Use Cases „Kooperative Umfeldwahrnehmung“, „Hochgenaue Positionierung“ sowie „Manöverintention“ hinzugefügt, welche Synergien zu parallelen Aktivitäten nutzen. Hierbei flossen die Analysen zu Fahrempfehlungen des Fraunhofer IVI mit ein, welche systematisch

potentielle Problemsituationen des Mischverkehrs beschreiben. Die TU Chemnitz prüfte die bisherigen Konzepte zu MMI auf Eignung für die konkreten Anwendungsfälle mit dem Ergebnis, dass insbesondere die Dienste der Assistenzfunktion des NAVF hinsichtlich Nachvollziehbarkeit, Verständlichkeit und Akzeptanz der Nachrichteninhalte bewertet wurden.



**Abbildung 3: HarmonizeDD – Use Cases** (© Fraunhofer IVI)

Für eine erste Abschätzung der verkehrlichen Wirkung der Use Cases, wurde das Simulationsmodell des Testkorridors im Digitalen Testfeld Dresden von TU Dresden VLP erstellt. Dazu wurde anhand der realen Straßengeometrien das Simulationsnetz für den Untersuchungskorridor Zellescher Weg/Teplitzer Straße sowie dem Korridor Flughafen modelliert und um die Komponenten der bestehenden Verkehrsinfrastruktur (Lichtsignalanlagen, Wechselwegweisung etc.) ergänzt. In einem nächsten Schritt wurden die Verkehrsmengen, basierend auf den verfügbaren Dauerzählstellen und der verfügbaren Verkehrsmengenkarte, integriert. Dazu wurde ein Verfahren entwickelt, welches die Zähldaten der diskreten Messstellen aufnimmt und eine realistische Verteilung der Fahrtrouten berechnen kann. Die berechneten Routen dienen als Grundlage der Verkehrsnachfragemodellierung. In einem zweiten Schritt wurden die aktuellen Steuerungslogiken der Lichtsignalanlagen implementiert. Die so kalibrierte Verkehrsflussmikrosimulation bildet die Realität hinreichend genau ab (siehe Abbildung 4) und diente als Grundlage einer validen Abschätzung der Nutzenpotentiale der einzelnen Use Cases.



**Abbildung 4: Simulationsmodell inkl. mikroskopische Simulation** (© TU Dresden VLP)

Nach der Auswahl der verkehrlichen Anwendungsfälle wurden diese durch die physikalisch-funktionale sowie durch die dynamische Beschreibung konkretisiert. Während die physikalisch-funktionale Beschreibung als Teil

des Gesamtsystems AP 1 zugeordnet ist, wurde die dynamische Beschreibung in AP 2 durchgeführt. Diese Beschreibungen dienten als Grundlage zur Definition der **Kommunikationsprozesse und Interaktionsszenarien**. Es erfolgte die Analyse von Szenarien, die beschreiben, wie Verkehrsteilnehmer miteinander interagieren, sowie darauf aufbauend die Definition und Spezifikation der hierfür benötigten Kommunikationsprozesse.

Die Kommunikation und Interaktion basiert auf dem Austausch von V2X-Nachrichten sowohl zwischen den Fahrzeugen als auch in Kombination mit Infrastrukturelementen. Die entsprechenden Abläufe und Kommunikationsstrukturen wurden von Fraunhofer IVI in Zusammenarbeit mit IAV und BMW erarbeitet. Bei der Integration der Nachrichtentypen CAM, DENM, SPATEM, MAPEM und RTCMEM konnte auf bereits existierende ETSI-Standards (European Telecommunication Standardisation Institute) zurückgegriffen werden (siehe z.B. [9, 10]). Einen Überblick über die in HarmonizeDD eingesetzten Nachrichtenformate liefert Abbildung 5.

▪ Cooperative Awareness Message (CAM)	■	
▪ Decentralized Environmental Notification Message (DENM)	■ ■	
▪ Signal Phase and Timing Extended Message (SPATEM)	■	ETSI Standard
▪ MAP Topology Extended Message (MAPEM)	■	
▪ RTCM Extended Message (RTCMEM)	■	
<hr/>		
▪ Collective Perception Message (CPM)	■ ■	
▪ Maneuver Coordination Message (MCM)	■	ETSI Draft
<hr/>		
▪ Maneuver Recommendation Message (MRM)	■	Research Format
<hr/>		
Gesendet von <span style="color: blue;">Fahrzeug</span> Infrastruktur		

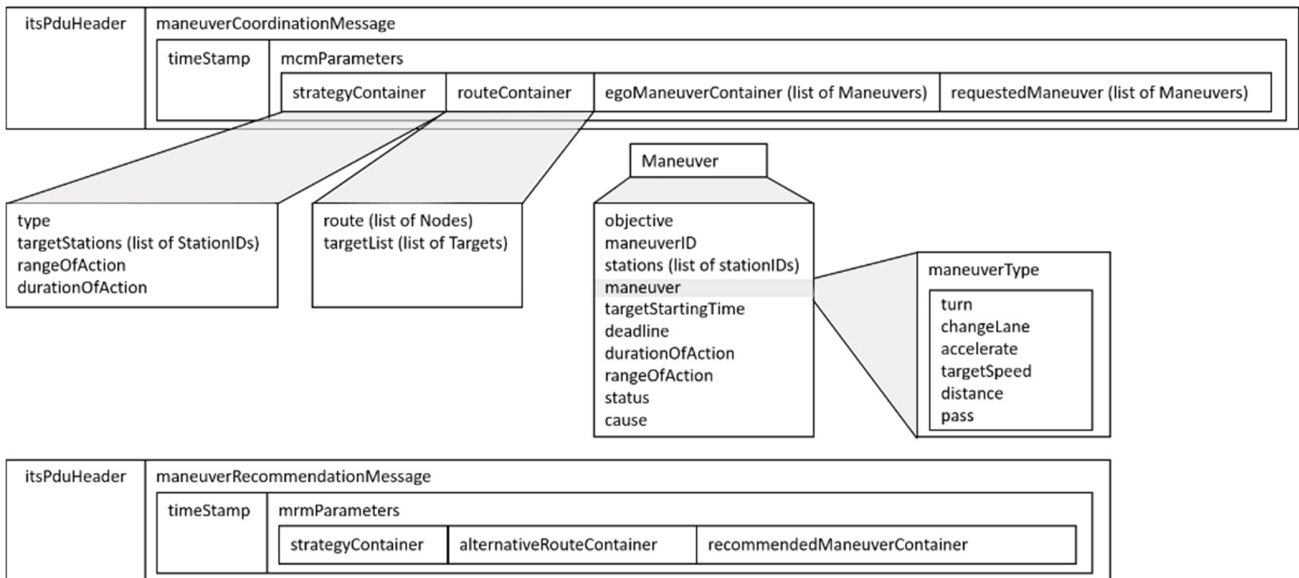
**Abbildung 5: V2X Nachrichtenformate in Fahrzeug/Infrastruktur** (© Fraunhofer IVI)

Insbesondere für die Funktionalitäten kooperativer Fahrmanöver wurden darüber hinaus die Nachrichtenformate „Collective Perception Message“ (CPM) und „Maneuver Coordination Message“ (MCM) benötigt, welche sich zum Zeitpunkt des Projektabschlusses von HarmonizeDD in einem frühen Draft-Stadium im ETSI-Standardisierungsgremium befanden. Im Forschungskontext kam zudem der „Maneuver Recommendation Message“ (MRM) besondere Aufmerksamkeit zu. MRM und MCM wurden federführend von Fraunhofer IVI in Abstimmung mit den Projektpartnern in HarmonizeDD ausgearbeitet. Die Ergebnisse wurden weiterführend für die technische Spezifikation des Kommunikationsstacks C4CART des Fraunhofer IVI verwendet. C4CART wurde für die Projektpartner zur Verfügung gestellt und von der IAV, Preh Car Connect und MUGLER an ITS- (Intelligent Transport Systems) bzw. ADF- (Automated Driving Functions) Anwendungen angebunden. Die TU Dresden VLP spezifizierte die Schnittstelle auf der Seite der Verkehrsleitzentrale inklusive der notwendigen Daten, welche zum Befüllen der Nachrichten für die kooperativen Manöver im Mischverkehr erforderlich sind.

Durch Fraunhofer IVI wurden die Inhalte der MCM und MRM aus HarmonizeDD direkt in den Standardisierungsprozess (TSI ITS Drafting Session zu „Maneuver Coordination Service“ (TR 103 578, TS 103 561)) eingebracht. Hierbei ist zu erwähnen, dass die Erarbeitung einer infrastruktureitigen Empfehlungsnachricht in noch keinem Standardisierungsgremium zuvor betrachtet wurde, da dort zunächst allein die fahrzeugseitige Koordinierung im Vordergrund stand. Bei der Spezifikation wurden Strukturen vorhandener Nachrichtenformate, insbesondere diese von CAM (Cooperative Awareness Message) und CPM berücksichtigt. Die Nachrichten MCM



und MRM sind eng gekoppelt, weisen ähnliche Datenstrukturen auf und greifen auf gleiche Datentypen zurück. Einen Überblick über die in HarmonizeDD eingesetzten Nachrichtenformate MCM und MRM gibt Abbildung 6.

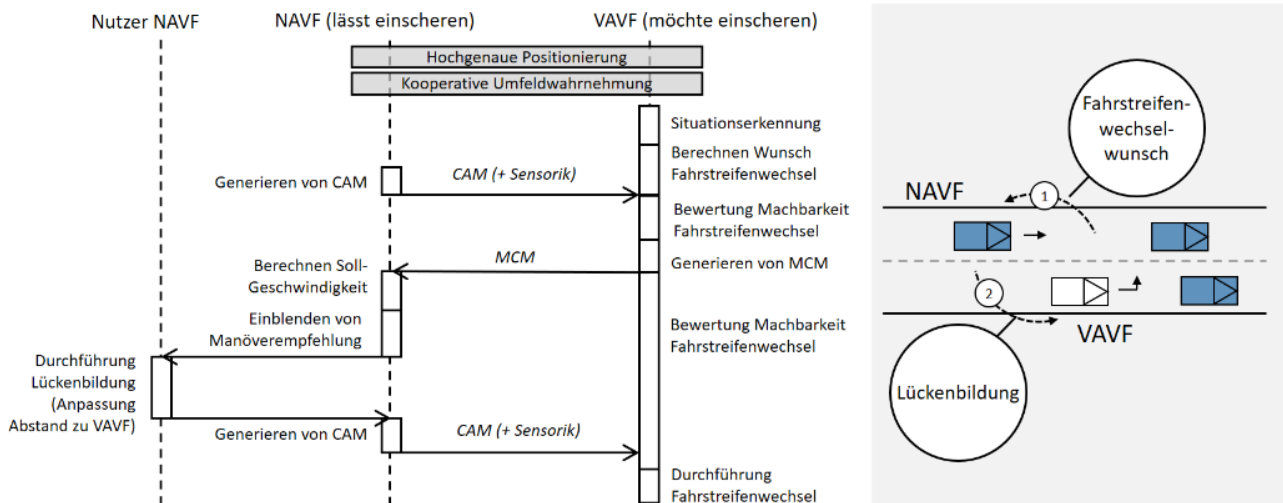


**Abbildung 6: Darstellung der Struktur der Nachrichten MCM und MRM** (© Fraunhofer IVI)

Die MCM wird vom Fahrzeug, die MRM von der Infrastruktur ausgesendet. Beide Nachrichtentypen bilden drei Ebenen von Informationen ab. Der „StrategyContainer“ enthält Informationen über die Fahrstrategie des Fahrzeugs bzw. über die Strategie, welche von der Infrastruktur empfohlen wird. Beispiele für Strategien sind: timeOptimal, energyOptimal, distanceOptimal, comfortOptimal, useGLOSA, ignoreGLOSA, etc. Die Übermittlung der Fahrstrategie kann bei der Prädiktion des Fahrverhaltens einbezogen werden und infrastrukturseitig für die Generierung von individuellen Fahrempfehlungen genutzt werden. Der „RouteContainer“ dient zur Übermittlung von zukünftigen bzw. geplanten Aktionen. Dies kann für mittelfristiges vorausschauendes Agieren direkt von umliegenden Verkehrsteilnehmern genutzt werden, aber auch von der Infrastruktur zum Zweck des Verkehrsflussmanagements Verwendung finden. Letzteres ist insbesondere dann von Interesse, wenn infrastrukturseitig eine alternative Route vorgeschlagen werden soll, welche idealerweise die bevorzugte Fahrstrategie des Zielfahrzeugs einbezieht. Hierbei sei angemerkt, dass Datenschutzbelange einbezogen werden müssen.

Die für HarmonizeDD wichtigsten Informationen betreffen konkrete Manöver. Diese werden in der MCM in den Listen „egoManeuverContainer“ sowie „requestetManeuverContainer“ gesammelt. Während die erste Liste die angestrebten Manöver des Ego-Fahrzeugs enthält, werden in der zweiten Liste Manöver von anderen Fahrzeugen angefragt, welche für die Durchführung der Ego-Manöver notwendig sind. Beide Listen enthalten Einträge des Datentyps „Maneuver“, welche je nach Listenzugehörigkeit interpretiert werden. Das Feld „deadline“ bezeichnet bspw. im Fall „ego“ den spätesten Zeitpunkt, an welchem mit dem eigenen Manöver begonnen werden kann. Im Fall „requested“ bezeichnet „deadline“ den spätesten Zeitpunkt an dem das angefragte Fahrzeug das angefragte Manöver beendet haben muss, damit das Ego-Fahrzeug sein beabsichtigtes Manöver durchführen kann. Hierbei sei erwähnt, dass ein entscheidender Vorteil des erarbeiteten Nachrichtenformats die Referenzierung zwischen Manövern ist. So kann als Grund für ein angefragtes Manöver die ID eines Ego-Manövers verwendet werden. Auch kann als Grund des Ego-Manövers das Manöver eines

anderen Fahrzeugs angegeben werden, z.B. wenn der Fahrstreifen gewechselt werden muss, weil das davor fahrende Fahrzeug bremst bzw. gebremst werden muss, da ein anderes Fahrzeug den Fahrstreifen wechselt. Der letzte Fall wird als eine Ausprägung in UC1 „Kooperativer Fahrstreifenwechsel“ behandelt. Die Ausprägung im Mischverkehr (VAVF als Einscherer, NAVF bildet die Lücke) ist in Abbildung 7 dargestellt.



**Abbildung 7: Dynamische Beschreibung des UC1 "Kooperativen Fahrstreifenwechsel"** (© Fraunhofer IVI)

Hierbei ist zu erwähnen, dass die MCM nur vom VAVF versendet wird, während das NAVF auf den Versand von CAMs begrenzt ist. Der Grund dafür ist, dass ein NAVF wenig Informationen über die Absichten des Fahrers haben und insbesondere keine Aussagen über Orts- und Zeitangaben machen können, welche für die Beschreibung der Manöver notwendig sind. Der Vorteil der Nutzung der MCM liegt in der Möglichkeit, detaillierte Angaben über Zeit und Ort des geplanten Manövers zu tätigen, den Status mitzuteilen bzw. Referenzierungen zuzulassen. Abbildung 7 illustriert die Funktionalitäten, welche in diesem Fall auf Seiten des VAVF bzw. des NAVF realisiert werden müssen. Funktionalitäten zur hochgenauen Positionierung bzw. zur kooperativen Umfeldwahrnehmung werden hier vorausgesetzt, um das Lagebild adäquat erfassen zu können bzw. entsprechend genaue Informationen zum Raum-Zeit-Verhalten abzuleiten.

Auf NAVF-Seite werden insbesondere Funktionalitäten zur visuellen Darstellung des HMI zur Unterstützung des menschlichen Fahrers bei der Kooperation mit dem einscherenden Fahrzeug benötigt. Im ersten Schritt wurden von der TU Chemnitz Fokusgruppendifkussionen durchgeführt – eine Methode, die sich besonders in frühen Entwicklungsstadien eignet, um Einstellungen und Bedürfnisse potentieller Nutzer neuer Technologien zu erfassen. Insgesamt wurden drei Fokusgruppen konzipiert und ausgewertet, um den Informationsbedarf potentieller NAVF- sowie VAVF-Nutzer in den ausgewählten Use Cases zu bestimmen, nach Relevanz zu gewichten und schließlich den optimalen Anzeigeort der relevantesten Informationen zu identifizieren. Abbildung 8 zeigt beispielhafte Ausschnitte der Animationsvideos für die ausgewählten Use Cases, die zur Veranschaulichung für die Fokusgruppenteilnehmer erstellt wurden.



Abbildung 8: Screenshots der Animationsvideos zur Veranschaulichung der Use Cases [5]

Die Ergebnisse zeigten, dass besonders zu Beginn der Systemnutzung als auch in Situationen, in denen seltene und unnatürliche, spezifische Verhaltensweisen gezeigt oder verlangt werden, umfangreichere Informationen wünschenswert sind (z.B. Auslöser für Verhalten anzeigen – Rettungswagen). Zudem sollten HMIs aufgrund der unterschiedlichen Erfahrungswerte von Insassen/Fahrern und der damit einhergehenden unterschiedlichen Mengen an benötigten Informationen adaptiv gestaltet sein. Eine vollständige Darstellung der Studie kann der zugehörigen Publikation entnommen werden [5].

## 2.3 Mobile Cloud (AP 3)

Die wesentlichen Ergebnisse des AP 3 waren die Konzeptionierung und Umsetzung eines Funktionsmusters einer mobilfunkseitigen Cloud-basierten Lösung mit Integration der neuen C-ITS Dienste für VAVF und NAVF.

Die zentralen Arbeitsschritte zum Erreichen der nachfolgend beschriebenen Ergebnisse waren:

- Anforderungsanalyse der Mobile Cloud (BMW, Preh Car Connect, Vodafone, Fraunhofer IVI, IVM, TU Dresden VLP)
- GeoMessaging Server (BMW, Vodafone, Fraunhofer IVI)
- Verkehrliche Anwendung (BMW, Vodafone, Fraunhofer IVI, IVM, TU Dresden VLP)
- Anbindung VAMOS an Mobile Cloud (Fraunhofer IVI, TU Dresden VLP)
- Integration der C-V2X-Module (Preh Car Connect, Vodafone, Fraunhofer IVI)

Die Arbeiten umfassten in einem ersten Schritt die **Anforderungsanalyse der Mobile Cloud**, welche in die IT-Infrastruktur des Fraunhofer IVI eingebunden wurde, inklusive der Anbindung an das Verkehrsmanagementsystem VAMOS, welche durch TU Dresden VLP realisiert wurde, sowie der Anbindung an das Ressourcenmanagementsystem REMAS, gehostet von Fraunhofer IVI. Weiterhin wurden die Anforderungen zur Anbindung an den GeoMessaging Server sowie die verkehrlichen Anwendungen der Mobile Cloud spezifiziert. Hierzu lieferten die Partner BMW, Preh Car Connect, Vodafone, Fraunhofer IVI, IVM und TU Dresden VLP wesentlichen Input.

Zur Implementierung und Umsetzung des **GeoMessaging Servers** wurde von Vodafone eine Instanz im eigenen Mobilfunknetzwerk spezifiziert, integriert und getestet, welche dazu diente, gezielt V2X-Nachrichten und -Dienste auf Basis geografischer Gebiete zur Verfügung zu stellen. Hierbei können die Nachrichten einerseits von Fahrzeugen bzw. RSUs mit ihrer Umgebung bzw. der Mobile Cloud ausgetauscht werden, andererseits kann die Mobile Cloud selbst V2X-Nachrichten an Fahrzeuge oder RSU in definierte Gebiete senden (siehe Abbildung 9). Zur Umsetzung wurden die Fahrzeuge sowie die RSU mit LTE-Routern ausgestattet, in welchen das GeoMessaging integriert ist. Der GeoMessaging Server diente als Routing Instanz zur Umsetzung der

geografischen Adressierung basierend auf IP-Multicast mit IPv6-Adressen. Die IPv6-Adresse enthält einen Bezug zur verwendeten Mobilfunkzelle (bzw. mehrerer Zellen). Die V2X-Nachrichten wurden an die IPv6-Multicast-Adresse verschickt, die das Zielgebiet repräsentiert und somit nur in dem Gebiet verbreitet, das durch diese entsprechende bestimmt wird. Das Gebiet wird über einen konfigurierbaren Radius um eine Position definiert. Für die Mobile Cloud Plattform konnte das GeoCast-Gebiet auf Nachrichtenebene definiert werden. Die Umsetzung erfolgte über ein JSON Interface (Latitude, Longitude, Radius). Die Default-Konfiguration ist eine IPv6-Multicast-Gruppe. Hier kommt ebenfalls das oben beschriebene Prinzip zum Einsatz, dass die IPv6-Multicast Adressen den Bezug zu den Mobilfunkzellen herstellen.

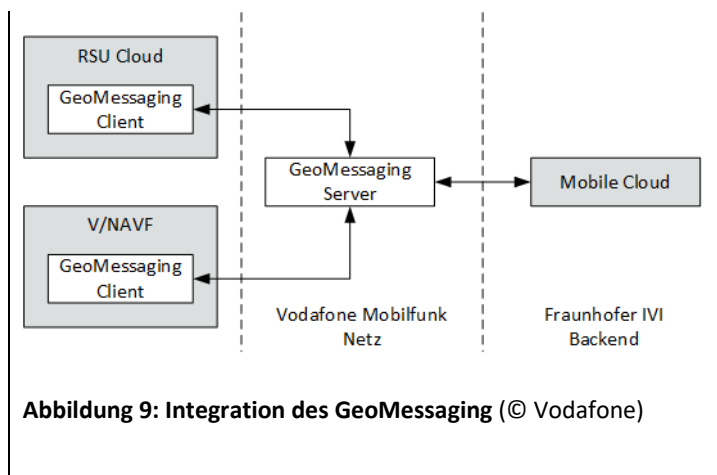


Abbildung 9: Integration des GeoMessaging (© Vodafone)



Abbildung 10: LTE-Router mit GeoMessaging Client (© Vodafone)

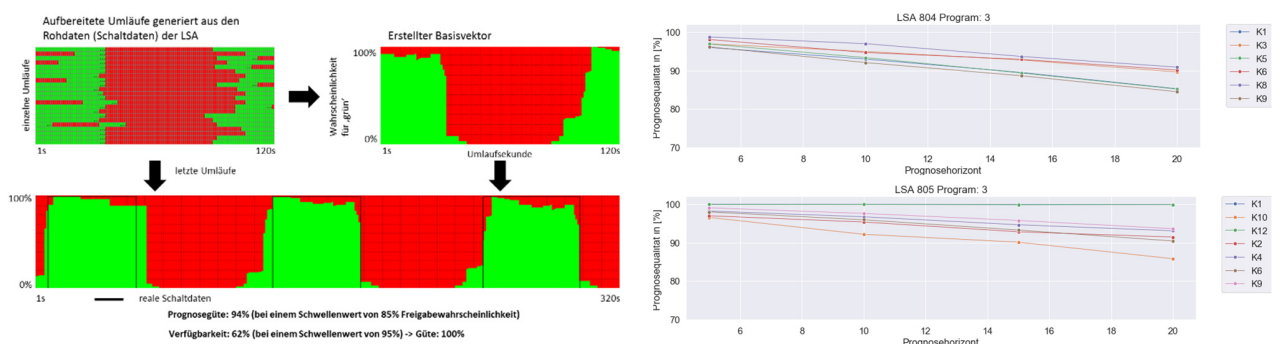
Für die Integration der GeoMessaging-Server-Instanz in das Vodafone Mobilfunknetz wurden Kommunikationswege innerhalb des Netzwerks definiert und implementiert sowie projektspezifisch konfigurierte SIM-Karten bereitgestellt. Die Anbindung des GeoMessaging-Servers an die Mobile Cloud erfolgte über eine WebSocket/JSON Schnittstelle, welche in Zusammenarbeit mit Fraunhofer IVI definiert und umgesetzt wurde. Auf der Clientseite wurden Linux-basierte, mobile LTE-Router für den Einsatz in Fahrzeugen und RSU mit einem GeoMessaging-Client ausgestattet (siehe Abbildung 10).

Für das Konzept der Mobile Cloud wurden zunächst die Anforderungen basierend auf den **verkehrlichen Anwendungen** von BMW, Fraunhofer IVI, TU Dresden VLP und Vodafone analysiert. Gegenstand war die Entwicklung von verkehrlichen Basisdiensten der Mobile Cloud, die flächendeckend über Mobilfunk an alle Fahrzeuge bereitgestellt werden können. Für die Übermittlung der V2X-Nachrichten in die Mobile Cloud wurde der Kommunikationsstack C4CART angepasst und Backend-seitig auf der Mobile Cloud integriert. Es war so erstmals möglich sowohl Backend-seitig, als auch RSU-seitig den identischen Kommunikationsstack einzusetzen und Nachrichten und Nachrichtenformate in gleicher Art und Weise zu versenden. Die hybride Kommunikation über mehrere Kommunikationswege konnte umgesetzt und demonstriert werden. Das projektextern beschaffte VAVF von Fraunhofer IVI wurden mit den entsprechenden Kommunikationstechnologien IEEE WLAN 802.11p und GeoMessaging via LTE ausgestattet und entsprechend der Systemspezifikation an die Mobile Cloud angebunden. Es wurden darüber hinaus C-ITS-Applikationen, wie u.a. die dynamische Objektkarte für die Mobile Cloud entwickelt und integriert. Die dynamische Objektkarte umfasst bspw. die Positionsdaten der dynamischen Informationen der vernetzten Instanzen (Fahrzeuge) aber auch dynamische Informationen der signalisierten Knotenpunkte (LSA) und stellt damit ein erweitertes Verkehrslagebild zur Verfügung, welches Informationen über den Verkehrszustand aber auch einzelne Verkehrsteilnehmer (Position, Richtung und Intension via MCM) enthält.

Hinsichtlich der Betrachtung der verkehrlichen Anwendungsfälle wurden von TU Dresden VLP anhand des Testkorridors die verfügbaren Daten der Lichtsignalanlagen, der Verkehrsdetektoren sowie der fusionierten Verkehrsinformationen im Verkehrsmanagementsystem (Verkehrslagebild) ausgewertet. Diese Daten bildeten, neben den Daten der ausgestatteten Testfahrzeuge sowie der erstellten Verkehrsflusssimulation, die Grundlage für die umzusetzenden Verfahren zur Prognose von Signallaufzeiten (siehe Abbildung 11), der Rückstausituation vor der Haltlinie (siehe Abbildung 12) oder der allgemeinen Verkehrslage auf dem Streckenzug.

Für die Pilotstrecke wurden alle verfügbaren Verkehrsströme an den Lichtsignalanlagen geografisch modelliert und es erfolgte die Zuordnung der Signalgruppen. Die Daten wurden bereits in das avisierte Datenaustauschformat DATEX II überführt. Für den aktiven Datenaustausch mit der Mobile Cloud wurde geprüft, inwieweit das Datenmodell von DATEX II den Anforderungen an Informationsumfang und Genauigkeit genügt bzw. an welchen Stellen eine Erweiterung des Datenmodells (Level B, Level C) notwendig ist und zwischen TU Dresden VLP und Fraunhofer IVI abgestimmt. Darauf basierend passte TU Dresden VLP ein Verfahren zur Prognose von Signaldauern verkehrsabhängiger Lichtsignalanlagen hinsichtlich der Anforderungen der definierten Use Cases an. Der Algorithmus wurde so ausgelegt, dass die Qualität der Prognose jederzeit durch Verringerung der Latenz im Gesamtsystem (Zeit bis die Information über die aktuellen Signal-/Detektorzustände in der Zentrale vorliegt) verbessert werden kann. Die aktuell generierten und publizierten DATEX II Nachrichten benötigen lediglich eine Level B Erweiterung und sind somit aufwandsarm zu interpretieren. Bei der Übertragung weiterer Dateninhalte soll weiterhin darauf geachtet werden, keine signifikanten Abweichungen vom DATEX II Standard vorzunehmen.

Auf Basis der von den RSUs sekundlich gelieferten Rohdaten (Detektoreingänge, Signalgruppenstatus etc.) für einzelne Umläufe einer Lichtsignalanlage sowie den in VAMOS hinterlegten historischen Steuerungsdaten der Lichtsignalanlage wird für jede Signalgruppe ein Prognosevektor erstellt, der in Abhängigkeit der aktuellen Umlaufsekunde eine Vorhersage des zukünftigen Signalzustandes liefert, wobei diese aus der Wahrscheinlichkeit einer Freigabe besteht. Die Prognosegüte nimmt dabei insbesondere für stark verkehrsabhängige Steuerungen mit zunehmenden Prognosehorizont erwartungsgemäß ab. Feste Freigabefenster können jedoch in jedem Fall prognostiziert werden. Das Verfahren ist exemplarisch in Abbildung 11 dargestellt.



**Abbildung 11: Prinzip und Ergebnisse der Schaltzeitprognose (© TU Dresden VLP)**

Für die Prognose der Rückstaulänge (Abbildung 12) wurde ein rein simulativer Ansatz gewählt, welcher valide Ergebnisse lieferte. Allerdings war hiermit eine spurselektive Prognose des Rückstaus nur bedingt möglich, da für diese im Zulauf des Knotens zusätzliche Detektoren nötig wären und diese nicht an jedem Knotenpunkt zur Verfügung standen.

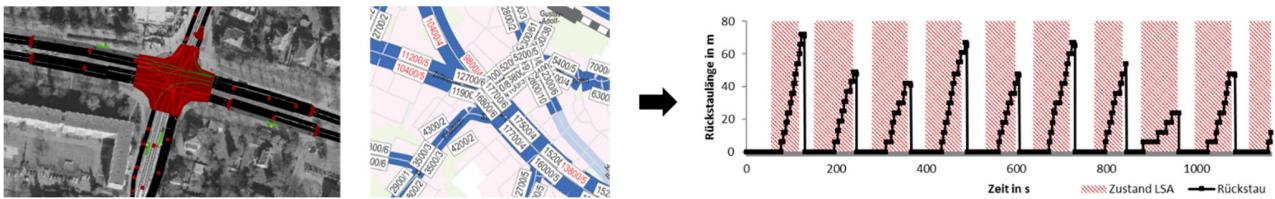


Abbildung 12: Prinzip und Ergebnisse der Rückstauprognose (© TU Dresden VLP)

Weiterhin wurden auf Basis der publizierten Daten der Signalzustände diverse Messfahrten durchgeführt. In Abbildung 13 ist eine Messfahrt zu sehen, bei der eine Android-Applikation (Eigenentwicklung) zur Darstellung der Signalprognosen zum Einsatz kommt. Aufgrund der guten Vorhersagequalität der Daten ließen sich bereits mit den aktuell noch hohen Latenzzeiten zwischen LSA und Verkehrsrechner und dem Einsatz einer Standard LTE-Mobilfunkverbindung (Vodafone-Netz) gute Ergebnisse erzielen.



Abbildung 13: Analyse Latenzzeiten und Validierung der Schaltzeitprognose (© TU Dresden)

Von Fraunhofer IVI wurde die Mobile Cloud als Backend System konzipiert, implementiert und in das Gesamtsystem integriert. Die Integration beinhaltet insbesondere die Konzeption und Umsetzung der Anbindungen an das REMAS Backendsystem sowie an den GeoMessaging Server.

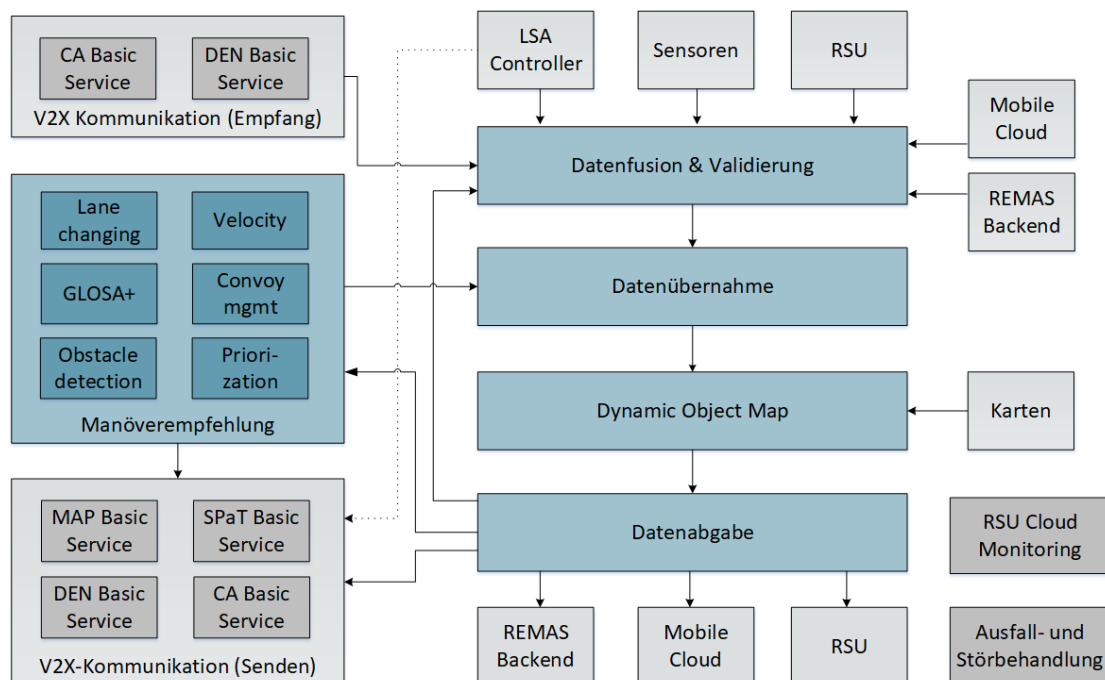
Im Zuge der **Anbindung von VAMOS an die Mobile Cloud** wurde die zuvor benannte DATEX II Schnittstelle definiert und adaptiert. Fraunhofer IVI erarbeitete gemeinsam mit TU Dresden VLP die Spezifikation der Schnittstelle. Die Schnittstelle wurde so konzipiert, dass insbesondere die Aspekte hinsichtlich des Informationsbedarfs der Mobile Cloud für das Verkehrslagebild mit einfließen. Dies war vorwiegend die Berücksichtigung der Latenzzeiten und der entsprechend referenzierten Dateninhalte. Hier wurde eine Erweiterung der zentral applizierten dynamischen Objektkarten gegenüber den dezentral applizierten dynamischen Objektkarten der RSU notwendig. In diesem Zuge fanden umfassende algorithmische Anpassungen statt. Weiterhin wurde die Schnittstelle derart erweitert, dass diese Latenzzeiten erkannt werden und aufbauend eine Qualitätsabschätzung der darauf basierenden verkehrlichen Anwendungen und Dienste (z.B. LSA-Prognose für GLOSA oder Rückstauschätzung) übermittelt werden konnte. Die Mobile Cloud stellt weiterhin eine Schnittstelle für die Bereitstellung der zentralen Dienste für die Versuchsfahrzeuge zur Verfügung.

Im Zuge der **Integration und des Tests der C-V2X Module** wurden für die Nahbereichskommunikation erste prototypische C-V2X Module beschafft und für die Integration in das Gesamtsystem von Vodafone bereitgestellt. Diese Module wurden mithilfe der Projektpartner Fraunhofer IVI an den Kommunikationsstack C4CART angebunden und prototypisch im Labor getestet. V2X-Nachrichten konnten damit selektiv oder parallel mit den drei Übertragungstechnologien IEEE WLAN 802.11p, C-V2X oder GeoMessaging via LTE versendet und empfangen werden. Hierbei ist hinsichtlich der hybriden Nutzung im Zuge der RSU zu beachten, dass IEEE WLAN

802.11p und C-V2X im gleichen Frequenzband senden und es bei höherer Last zu gehäuften Kollisionen der Nachrichten kommen kann. Dies ist der Fall, da die beiden Systeme nicht interoperabel sind und Kollisionsvermeidungsverfahren nicht wechselseitig funktionieren. Fraunhofer IVI integrierte die Spezifika von C-V2X in die Servicedefinition der verkehrlichen Anwendungen. Weiterhin erweiterte Fraunhofer IVI das Konzept des projektextern beschafften VAVF unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Labortests der prototypischen C-V2X Funktionsmuster. Preh Car Connect erstellte eine Potential- und Anforderungsanalyse bezüglich der Verteilung von Cloud-basierten Anwendungen und Funktionen der Mobile Cloud. Dazu wurden unter anderem Tests mit dem auf der Connectivity-Box verbauten LTE-Modul durchgeführt. Hierbei wurden vordergründig Verbindungstests zum REMAS-Backend des Fraunhofer IVI durchgeführt. Eine Integration und Erweiterung der Connectivity-Box von Preh Car Connect um C-V2X ist im Zuge der Verwertung geplant, konnte jedoch aufgrund aktuell nur prototypisch verfügbaren Hardware noch nicht realisiert werden.

## 2.4 RSU (AP 4)

Die wesentlichen Ergebnisse des AP 4 sind die technische Spezifikation bzgl. Hardware und Softwarekomponenten der RSU und deren Umsetzung als Funktionsmuster. Hierzu wurden ebenfalls alle Schnittstellen zu anderen Subsystemen, entsprechend Abbildung 14 definiert.



**Abbildung 14: Module der RSU** (© Fraunhofer IVI)

Die zentralen Arbeitsschritte zum Erreichen der nachfolgend beschriebenen Ergebnisse waren:

- Spezifikation (MUGLER, Fraunhofer IVI)
- Schnittstellen (MUGLER, Fraunhofer IVI)
- Dienste und Funktionen (MUGLER, Fraunhofer IVM)
- Ausfall- und Störereignisse (MUGLER, IVM)

In einem ersten Schritt wurde die **Spezifikation der RSU** federführend von MUGLER mit Input durch Fraunhofer IVI hinsichtlich Konzeptionierung und Integration in die Gesamtarchitektur erarbeitet. Basis waren die Dienste und Kommunikationsfunktionen. Der Fokus lag hierbei auf der einzusetzenden Hardware. Als Ergebnis wurde eine Rechnerplattform beschafft sowie ein geeignetes Gehäuse ausgewählt. Die vorgesehene Linux-Distribution wurde den Projektpartnern im Laufe des Projektes zur Verfügung gestellt und gemäß deren Anforderungen erweitert. Dies betraf insbesondere die zur Verfügung stehenden Bibliotheken. Für die dynamische Objektkarte und die Anwendungen der Partner wurde außerdem die Virtualisierungsumgebung „Docker“ in die Distribution integriert. Zum Einsatz im Digitalen Testfeld Dresden wurde die OrbittyBox als Evaluationsplattform favorisiert und integriert. Für das hochautomatisierte Fahren im urbanen Umfeld benötigt das Fahrzeug die Möglichkeit der fahrstreifengenauen Ortung. Hierfür müssen D-GNSS Korrekturdaten von der Infrastruktur bereitgestellt werden. Deshalb wurde der 2-Frequenz-GNSS Empfänger ins System der RSU integriert.

In einem weiteren Schritt wurden von MUGLER und Fraunhofer IVI die **Schnittstelle der RSU** sowohl zur Mobile Cloud, als auch zu den Fahrzeugen spezifiziert. Es wurde in Abstimmung mit den Projektpartnern definiert, dass die RSU die gleiche Schnittstelle wie die NAVF und VAVF verwenden soll. Somit ist, neben IEEE WLAN 802.11p, eine zusätzliche direkte Kommunikation mit den Fahrzeugen über LTE und GeoMessaging sowie über C-V2X möglich. Für ersteres werden die Nachrichten als Multicast an die Kommunikationspartner weitergereicht. Um eine geografische Zuordnung der Kommunikationspartner zu erreichen, werden diese in Multicast-Gruppen aufgeteilt. Der GeoMessaging Server von Vodafone regelt diese Aufteilung für die Übertragung via LTE. Als weitere Übertragungstechnologie wurde C-V2X prototypisch eingebunden. Somit ist eine hybride Kommunikation über die genannten drei Technologien mit den Kommunikationspartnern möglich. Dies bietet eine Reihe von Vorteilen. Auf diese Weise können Verkehrsteilnehmer mit unterschiedlich ausgestatteten Kommunikationstechnologien erreicht werden, und für Verkehrsteilnehmer, die ebenfalls hybrid kommunizieren, erhöht sich die Verfügbarkeit der bereitgestellten Informationen infolge von Redundanz. Weiterführend erfolgte durch Fraunhofer IVI die Spezifikation und Umsetzung der Kommunikationsfunktionen der RSU in Bezug auf die Schnittstelle mit der Mobile Cloud. Die Kommunikation erfolgt dabei anwendungsspezifisch über Remote Procedure Calls (grpc) oder Nachrichten-basiert über MQTT. Entsprechende Nachrichteninhalte wurden spezifiziert. Der Fokus lag einerseits auf einer effizienten Nutzung der Ressourcen (insbesondere der in ihrer Bandbreite beschränkten LTE-Verbindung), andererseits wurde eine leichte Erweiterbarkeit sichergestellt. Ausgetauscht werden unter anderem Informationen zum aktuellen LSA-Zustand zwischen RSU und Mobile Cloud. Auf der anderen Seite dient die Mobile Cloud als Quelle für Kartendaten sowie den Prognosedaten aus VAMOS.

Weiterführend wurden die **Dienste und Funktionen der RSU** spezifiziert und umgesetzt. Dies umfasste einerseits spezielle Dienste des NAVF und VAVF im Mischverkehr (bspw. Manöverempfehlungen) sowie andererseits die dynamisch mikroskopische Objektkarte als wesentliche Informationsbasis für diese Dienste. MUGLER und IVM entwickelte die dynamische Objektkarte federführend inkl. der dazugehörigen Input- und Output-Module. Dazu wurden im Austausch mit dem Fraunhofer IVI und MUGLER benötigte Funktionalitäten und Daten identifiziert. Darauf aufbauend wurden Datenschnittstellen spezifiziert und unter Verwendung eines gemeinsam genutzten Datenformats implementiert. Im Folgenden wurde das Grundgerüst der Objektkarte entworfen und umgesetzt. Besonderes Augenmerk lag dabei auf der Erweiterbarkeit der Objektkarte. Sie sollte während des Projektes und darüber hinaus an sich weiterentwickelnde Anforderungen angepasst werden können. Aufgrund des Anspruchs an Modularität wurden im Wesentlichen zwei Typen von Strukturen vorgesehen: Services und Datenschichten.



Eine Datenschicht dient der Ablage einer zusammenhängenden Art von Daten, beispielsweise der Beschreibung des Straßennetzes, der Eigenschaften der sich darauf bewegenden Fahrzeuge oder daraus abgeleitete Warnungen und Empfehlungen. Sie sieht selbst jedoch keine datenverarbeitende Funktionalität vor. Es erfolgte die Gruppierung und die Zuordnung der definierten Funktionen auf die Objektkartenmodule. Für die Datenhaltung erforderliche Datenschichten wurden abgeleitet. Daran schlossen sich der Entwurf, die Implementation und die Testung der Module an.

Ein wesentliches Ziel der infrastrukturseitigen dynamischen Objektkarte war die Unterstützung des Nachrichtentyps Maneuver Recommendation Message (MRM), die für die Kommunikation der Infrastruktur mit den Fahrzeugen spezifiziert wurde. Hierbei können den Fahrzeugen Empfehlungen bzgl. Fahrstrategien, alternativer Routen sowie konkreter Fahrmanöver übermittelt werden. Weiterhin war es die Unterstützung der Maneuver Coordination Message (MCM), welche nur von den Fahrzeugen ausgesendet werden kann, aber für die Infrastrukturseite ebenfalls von hohem Interesse ist, da sie u.a. Informationen über die Fahrabsichten der Fahrzeuge enthalten. Entsprechend wurde die RSU in die Lage versetzt, die MCM und MRM Nachrichten verarbeiten zu können. Darüber hinaus wurden von Fraunhofer IVI in enger Zusammenarbeit mit MUGLER und IVM Funktionen für die RSU umgesetzt, welche Empfehlungen bzw. Informationen über z.B. die LSA-Zustände und Prognosen generiert und in die entsprechenden Nachrichtenformate integriert. Neben der reinen Umsetzung der Funktionsmodule wurden mehrere Ende-zu-Ende Latenztests durchgeführt. Somit konnte sichergestellt werden, dass insbesondere die zeitkritischen Informationen in der SPATEM rechtzeitig im Fahrzeug eintreffen. Die entsprechenden Ergebnisse wurden außerdem wissenschaftlich publiziert [11].

Reale Positionsdaten, zumeist bereitgestellt über GPS-Sensoren, unterliegen Störungen. Diese rufen Schwankungen hervor, die bei ungefilterter Verwendung in der Objektkarte zu sprunghaft wechselnden Positionen und in Folge wechselnden Fahrtrichtungen, Fahrstreifenzuordnungen und Handlungsempfehlungen führen können. Ein in der Wissenschaft erprobter Ansatz, diesem Problem zu begegnen, ist die Filterung (das Tracking) der Messdaten vor ihrer weiteren Verwendung. Konkret wurde dazu ein Partikelfilter zum Einsatz gebracht. Hierfür wurde eine Softwarebibliothek realisiert und in die Objektkarte eingebunden. Beruhend auf dem ebenfalls implementierten CTRV-Bewegungsmodell, welches über kurze Zeitabschnitte hinweg konstante Geschwindigkeiten und Drehraten annimmt, wurden Positionsdaten von Objekten bei Eingang in die Objektkarte gefiltert und damit stabilisiert. Die so stabilisierten Daten wurden über eine Erweiterung der Module zur Objektdatenabfrage bereitgestellt, sollen zukünftig aber auch der Verbesserung der Objekt-Fahrstreifen-Zuordnung dienen.

Für die Entwicklung von Anwendungen und der Objektkarte wurde von MUGLER ein Entwicklungswerkzeug bereitgestellt. Hierfür war ein Cross-Compiler notwendig. Um eine komfortable Nutzung zu ermöglichen, wurde eine Virtuelle Maschine angelegt, die sowohl den Cross-Compiler, als auch eine Entwicklungsumgebung enthält. Um den Projektpartner ein komfortables Erstellen von Containern mit ihren Anwendungen zu ermöglichen, wurde in die Entwicklungsumgebung ein Docker-Plugin integriert. Die Virtuelle Maschine zum Entwickeln von Anwendungen in der RSU wurde den Projektpartnern während der Projektlaufzeit zur Verfügung gestellt.

Das Fraunhofer IVI stellte eine RSU für Test- und Applizierungszwecke zur Verfügung, die bereits vor der Inbetriebnahme der Testkorridore alle im Rahmen von HarmonizeDD entwickelten Funktionen unterstützte und den Partnern die Möglichkeit gab, fahrzeugseitige Entwicklungen zu validieren. Außerdem wurden mehrere Applikationen zu Diagnosezwecken entwickelt (siehe Abbildung 15). Diese erlauben die Visualisierung der per

V2X-Kommunikation versendeten Informationen und dienen der Validierung bzw. Verifikation der versendeten Informationen. Im Zuge der Inbetriebnahme des Testfelds wurde das RSU-Management durch Fraunhofer IVI übernommen. Dies umfasste die Bereitstellung und den Betrieb der RSU inkl. aller benötigten V2X-Applikationen, wie z.B. SPATEM inkl. GLOSA für alle Projektpartner zu den Testterminen, das Einrichten der Softwareumgebung (inklusive Updatemanagement) sowie Unterstützung bei der Diagnose von während der Testfahrten aufgetretenen Fehlern.



Abbildung 15: RSU- und V2X-Diagnose (© Fraunhofer IVI)

Für **Ausfall- und Störereignisse der RSU** wurde von IVM und MUGLER ein mathematisches Modell entwickelt, welches diese in der Kommunikationsinfrastruktur abbildet und Aussagen über konkrete Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit der ausgewählten Use Cases ermöglicht. Dieses Modell stellt die Grundlage für die simulative und analytische Auswertung sowie die Funktionalitäten zur Erkennung von Störereignissen in der RSU dar. Dazu wurde zunächst ein mathematisches Modell ermittelt, welches zur simulativen Auswertung der Nachrichtenausbreitung in einem komplexen Kommunikationsnetz geeignet ist. Dabei können verschiedene Routingvarianten und andere Besonderheiten (wie z.B. „hidden node“) untersucht werden.

Gerät (Letzte Status-Aktualisierung: 2020-06-25 11:54:13)		
Gerätename	sRSUFLH120 (sRSU-FLH120)	
Status	UP (HARD - 1/3)	
Ausgabe	PING OK - Packet loss = 0%, RTA = 65.78 ms	
Letzte Prüfung	2020-06-25 11:50:51	
Nächste Prüfung	2020-06-25 11:56:01	
Letzter Statuswechsel	2020-06-25 11:45:51	
Gesamtstatus	UP	
Gesamtausgabe	Der Host ist UP. Es sind 8 OK Dienste.	
Dienstname	Status	Ausgabe
Landline-tx-bytes	OK	SNMP OK - "2377213971" Bytes
Landline-rx1	OK	SNMP OK - "32260" bit/s
Landline-rx-bytes	OK	SNMP OK - "1722405530" Bytes
Landline-tx1	OK	SNMP OK - "38647" bit/s
VPN2nms-rx-bytes	OK	SNMP OK - "13517239" Bytes
VPN2nms-tx-bytes	OK	SNMP OK - "15588857" Bytes
VPN2nms-rx1	OK	SNMP OK - "0" bit/s
VPN2nms-tx1	OK	SNMP OK - "0" bit/s

Abbildung 16: RSU Monitoring (© Mugler)

Um die Auswirkungen von Ausfall- und Störereignissen auf diese Netzwerke zu untersuchen, wurde eine Kategorisierung verschiedener Ereignisse vorgenommen, welche die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen und der Infrastruktur stören können und die Relevanz für die vorliegenden Use Cases bewertet. Abschließend wurde das mathematische Modell erweitert, sodass lokale Störereignisse in der Kommunikation berücksichtigt werden können. Diese können sowohl die Verbindung einzelner Kommunikationspartner sowie auch die

Kommunikation in einer ganzen Region betreffen. Die Ergebnisse wurden in das Monitoringtool der RSU eingebunden (siehe Abbildung 16)

## 2.5 Integration VAVF (AP 5)

Die wesentlichen Ergebnisse des AP 5 sind die Entwicklung und Implementierung der notwendigen Funktionen der VAVF mit dem Ziel der Integration von Mobile Cloud Basisdiensten und erweiterten RSU Diensten in den automatisierten Fahrprozess.

Die zentralen Arbeitsschritte zum Erreichen der nachfolgend beschriebenen Ergebnisse waren:

- VAVF-Funktionen in Einzelszenarien (IAV, Fraunhofer IVI, TU Chemnitz, TU Dresden FZM)
- Vorausschauendes VAVF im Verkehrsfluss (IAV, Fraunhofer IVI, TU Dresden FZM)
- Funktionstests und Evaluation (IAV, Fraunhofer IVI, TU Chemnitz, TU Dresden FZM)

Der Fokus der inhaltlichen Arbeiten zur Umsetzung der **VAVF-Funktionen in Einzelszenarien** lag auf der Entwicklung von fahrzeugseitigen Funktionen, welche VAVF-Entscheidungsprozesse im urbanen Mischverkehr verbessern. IAV entwickelte intelligente Entscheidungsmechanismen innerhalb der automatisierten Fahrzeugsteuerung. Hierbei standen zunächst räumlich und zeitlich begrenzte Szenarien im Vordergrund, in denen die Interaktion des VAVF mit NAVF mittels Cloud-Diensten verbessert werden konnten. Die konkreten Ausprägungen der Use Cases und deren technische Anforderungen an die entsprechenden Fahrfunktionen gaben den Rahmen vor.

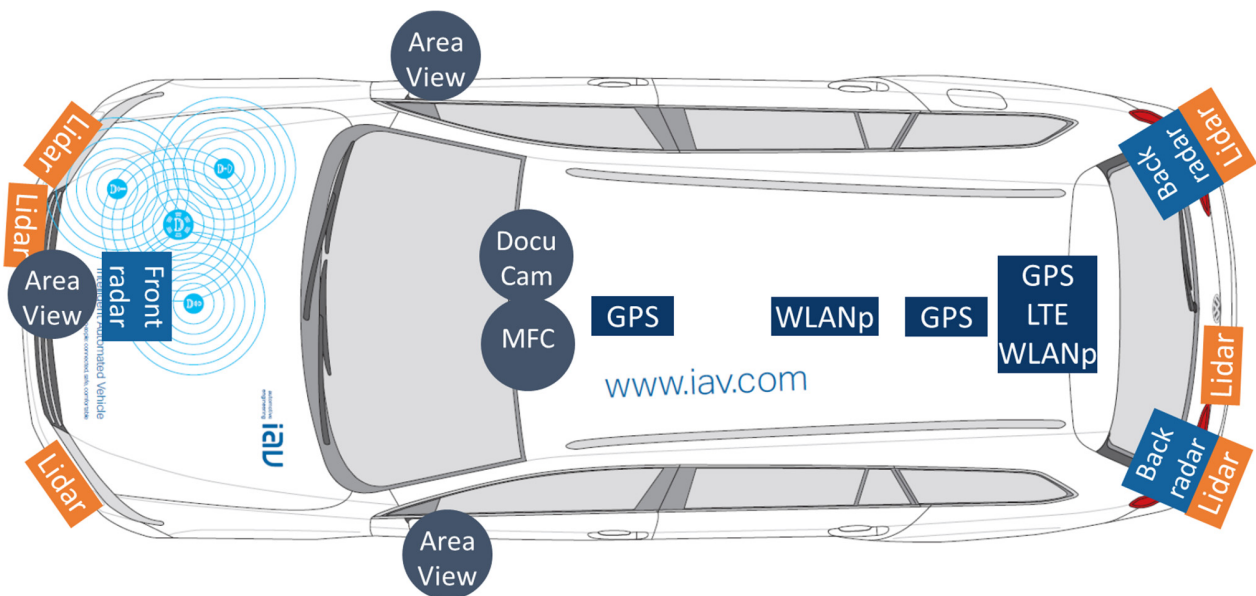


Abbildung 17: Sensorkonzept zur Umsetzung der verkehrlichen Anwendungen (© IAV)

Zur Entwicklung der fahrzeugseitigen Assistenzfunktionen wurden die in AP 1 ermittelten Anforderungen mit den Spezifikationen der fahrzeugseitigen Sensorik abgeglichen. Neben der Prüfung von technischen Parametern spielten bei der Erarbeitung eines Sensorkonzeptes auch betriebswirtschaftliche Aspekte eine Rolle. Außerdem wurde auf eine praxistaugliche Lösung Wert gelegt. Das heißt, auf komplexe Dachaufbauten soll verzichtet und stattdessen eine möglichst unauffällige Integration in die bestehenden Fahrzeugstrukturen verfolgt werden. Das

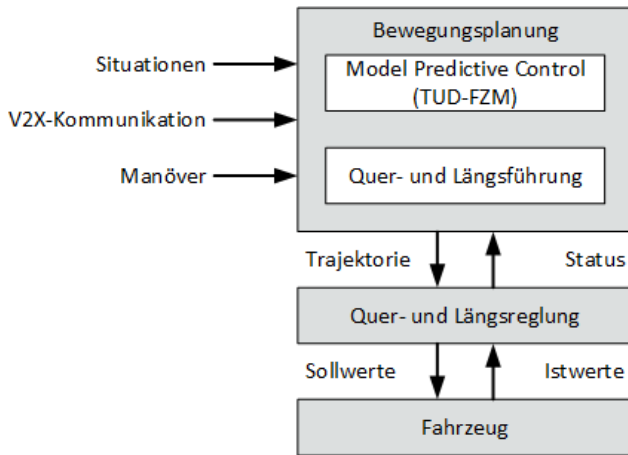
Ziel für die Entwicklungsingenieure war die Ermittlung eines optimalen Konzeptes für ein VAVF, um die in AP 2 definierten verkehrlichen Anwendungen umsetzen zu können. Abbildung 17 zeigt das resultierende Sensorsetup. Für das Umgebungslagebild könnten Redundanzen der verschiedenen Sensortypen genutzt werden, um die Robustheit z.B. gegenüber Wetterbedingungen zu erhöhen bzw. die Zuverlässigkeit der Objektdetektion zu steigern.

Die im Rahmen von AP 2 definierten verkehrlichen Anwendungen waren die Grundlage für eine umfangreiche Überarbeitung der Software-Architektur der hochautomatisierten Fahrfunktionen. Aufgrund der V2X-Kommunikation in den Use Cases wurde deren Integration in die Software der hochautomatisierten Fahrfunktionen schwerpunktmäßig verfolgt. Die Integration der V2X-Kommunikation in ein VAVF ist Teil der Entwicklung der Fahrfunktionen. Der von Fraunhofer IVI bereitgestellte Kommunikationsstack C4CART stellt Schnittstellen für den Empfang und das Versenden standardisierter und projektspezifischer V2X Nachrichten bereit. Diese Schnittstellen wurden in das VAVF-Systemkonzept generisch integriert und anschließend implementiert, sodass alle Nachrichten empfangen und versendet werden konnten. Hierbei wurden auch die über die Standardisierung hinausgehenden Nachrichtenformate MCM und MRM für die entsprechenden Use Cases berücksichtigt und in eigenen Funktionsmodulen vom System verarbeitet. Dies ermöglicht die Berücksichtigung der Entscheidung anderer Verkehrsteilnehmer. Zur Realisierung der dynamischen Objektkarte und der Algorithmen der Entscheidungsprozesse im Mischverkehr innerhalb der Mobile Cloud, stellte Fraunhofer IVI die dynamisch erfassten Objekte des projektexternen VAVF dem Backend via CPM-Nachricht zur Verfügung. Durch die Trennung von standardisierten und spezifischen Komponenten lassen sich ebenfalls weitere Use Cases integrieren. Um Nachrichten aus dem VAVF zu versenden, wurden die Schnittstellen zu C4CART weiterentwickelt. Weiterführend mussten durch die Anbindung der V2X-Funktionen interne AD-Systemschnittstellen, wie beispielsweise die Objektfusion interner Kameradaten und empfangener V2X-Nachrichten, angepasst werden.

Die V2X-Kommunikationsfunktionen wurden in den vorhandenen VAVF-Versuchsträger der IAV und Fraunhofer IVI integriert. Für die Verarbeitung der Nachrichten (SPATEM, MAPEM, MCM, MRM, CPM, CAM etc.) im Fahrzeug wurde eine Anbindung geschaffen. In der Software-Architektur des VAVF (ADF-Architektur) werden diese Informationen aus den zwei separaten Kommunikationspfaden Mobilfunkkommunikation (GeoMessaging via LTE) und direkte Kommunikation (IEEE WLAN 802.11p bzw. prototypisch C-V2X) gewonnen. Beide Pfade können parallel genutzt werden, wobei die tatsächliche Kommunikationstechnologie für die VAVF-Anwendung transparent ist. Dies ermöglichte die Verarbeitung der Verkehrslagebilder über Mobile Cloud und RSU. Zur Anbindung an C4CART realisierte die IAV einen Client, der die Daten empfängt und im System an die Verarbeitungsmodule weiterleitet. Verkehrsdaten wurden bspw. über die V2X-Nachricht SPATEM/MAPEM übertragen. Darauf aufbauend wurden in der AD-Architektur Module entwickelt und getestet, die die Funktionalität prototypisch abbilden. Bei der Entwicklung standen objekt- und serviceorientierte Ansätze im Vordergrund.

Für das **Vorausschauende VAVF im Verkehrsfluss** wurden Verfahren zur Fahrzeugsteuerung entwickelt, die eine über längere Streckenabschnitte und zwischen einzelnen Szenarien kohärente, komfortable, vorausschauende und effiziente Fahrweise ermöglichen. Eine wesentliche Kernfunktionalität der Fahrentscheidungsprozesse des AD-Systems ist die modell-prädiktive Längsregelung (MPC) der TU Dresden, welche zur Realisierung der energieeffizienten GLOSA in das VAVF der IAV integriert wurde. Neben der im Versuchsträger vorhandenen ACC-Funktionalität ergänzt die MPC die Längsregelung für den Fall, dass das VAVF frei fahren kann. Neben den

beschriebenen Modulen mussten geeignete Interfaces, Datenformate und Softwarebeschränkungen in der Architektur mit Funktionsmodulverantwortlichen abgestimmt und entwickelt werden. Die Komponente der TU Dresden FZM wurde in die IAV AD-Architektur integriert (siehe Abbildung 18).



**Abbildung 18: AD-Architektur (Auszug) (© IAV)**

Die empfangenen Prognoseinformationen der LSA wurden an Funktionsmodule der MPC übermittelt. Auf diese Weise war den Systemen bekannt, dass die LSA beispielsweise in 5 Sekunden in die Phase „rot“ umschalten wird. Folglich konnte eine vorausschauende Regelung vorgenommen werden. Folgende Schritte waren zur Integration der MPC nötig: Zuerst wurde für den in Simulink erstellten Algorithmus ein entsprechender Softwarefilter realisiert, der es erlaubt, die Längsregelung entsprechend zu kapseln. Bedingt durch die relativ hohen Rechenzeiten des Algorithmus (ca. 1 s) war es weiterhin nötig, einen Interpolator dem Modul nachzuschalten, der die entsprechenden Sollwerte in den geforderten Zeitscheiben zur Verfügung stellte.

Für das kooperativ-vernetzte Fahren war die Entwicklung von intelligenten Entscheidungsmechanismen in der AD-Software des automatisierten Fahrzeugs notwendig. Für die Analyse der Anforderungen in HarmonizeDD wurden neben dem genannten Use Case vor allem der „Kooperative Fahrstreifenwechsel“ sowie die Manöverempfehlungen mit anderen Verkehrsteilnehmern untersucht. Diese Szenarien wurden weiterentwickelt und im Hinblick auf den VAVF-Zustand (Fahrstreifen, relative Geschwindigkeit, Beschleunigung), zeitliche Abfolgen von Ereignissen (z.B. welches Fahrzeug erreicht früher die Kreuzung oder empfängt eine Nachricht zuerst) sowie die Analyse von Fehlern in der V2X-Kommunikation (z.B. nicht empfangene Nachrichten) untersucht. Parallel zu dieser Analyse wurden Konzepte zur „Dynamic Decision Making“, „Decentralised Decision Making“ und „Game Theory“ in der Literatur recherchiert und ihre Anwendbarkeit bewertet. Gleichzeitig definierte IAV Anforderungen an die Manöverbotschaften der V2X-Kommunikation MCM und MRM. Eine Detailspezifikation der Anforderungen an fahrzeug- und infrastrukturseitige Nachrichtenformate wurde erstellt, mit dem Ziel eine kooperative Entscheidungsfindung in den o.g. Szenarien zu ermöglichen. Für den UC1 „Kooperativer Fahrstreifenwechsel“ entstand ein Konzept zur grundlegenden technischen Umsetzung. Hierbei erfolgten Abstimmungen, insbesondere zur Koordination zwischen VAVF und NAVF. Die Forschungsaufgaben für IAV bestanden in der Entwicklung der Fahrfunktion, automatisiert den Fahrstreifen zu wechseln. Dafür musste die Fahrstreifenenerkennung nochmals verbessert werden, um parallel verlaufende Fahrstreifen zuverlässig zu erkennen. Die Regelungstechnik wurde in mehreren Iterationen soweit verbessert, bis der Fahrstreifenwechsel von den Insassen (aber auch außenstehenden Beobachtern) als eine harmonische Bewegung wahrgenommen

wird. Es ist außerdem darauf hinzuweisen, dass die für den automatisierten Fahrstreifenwechsel notwendigen Funktionen in den neu aufgebauten und projektextern finanzierten Versuchsträger der IAV und Fraunhofer IVI integriert wurden. Bevor die V2X-Funktionalität mittels MCM umgesetzt werden konnte, mussten zunächst Basisfunktionen für einen Fahrstreifenwechsel adaptiert und integriert werden. Die Integration der MCM ermöglichte es, die Fahrtrouten und manöverübergreifenden Intentionen anderer Verkehrsteilnehmer zu berücksichtigen. Durch die Anbindung der VAVF an die Mobile Cloud und die RSU (Fraunhofer IVI, IAV) konnten infrastrukturseitig MRM mit Fahrempfehlungen, Manöverempfehlungen und Fahrstrategien versendet werden, welche die gesamtheitliche Verkehrssituation des Korridorbereichs berücksichtigen.

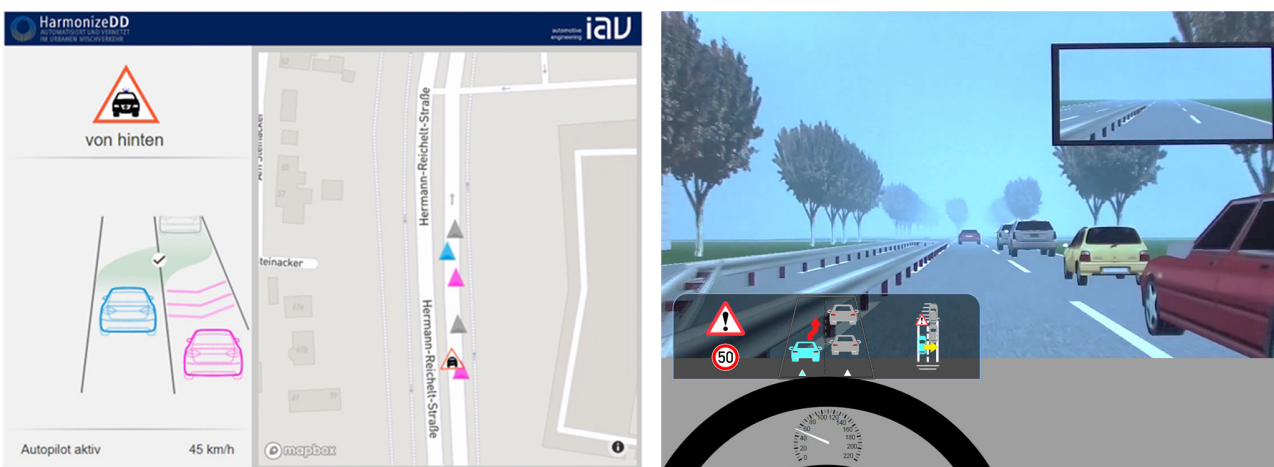
Im Zuge der **Funktionstests** wurde ein HMI-Konzept von IAV bereitgestellt, das verschiedene Varianten der Use Cases abdeckt, so dass erfolgreiche wie auch nicht-gelungene Kooperationen dem Insassen dargestellt werden können. Das Konzept wurde in einem ersten Schritt für den UC1 „Kooperativer Fahrstreifenwechsel“ prototypisch implementiert (inkl. Hell-Dunkel-Einstellung) und mit der Simulationssoftware SUMO verknüpft. Dies diente dazu, den Use Case zu simulieren und zeitgleich die Aktionen der beteiligten Fahrzeuge sowie V2X-Nachrichten-Übermittlung darzustellen. In einem zweiten Schritt wurde von IAV ein Manöverscreen für die VAVF-Nutzer zur Steigerung des Fahrkomforts in Mischverkehrsszenarien umgesetzt. Dieses wurde in den VAVF von IAV und Fraunhofer IVI integriert, technische Verfügbarkeiten bewertet sowie Tests begleitet. Grundlage für das Anzeigekonzept bildeten die Ergebnisse der Fokusgruppen zum Informationsbedarf von VAVF-Nutzern. Die Evaluierung wurde von der TU Chemnitz im Rahmen einer Laborstudie durchgeführt. Für ein akzeptables Nutzererlebnis wurde das vorhandene HMI erweitert. Der sogenannte Customer View zeigt das Ego-Fahrzeug sowie die erkannten Umgebungsmerkmale. Pfeile zeigen die möglichen Manöver an (siehe Abbildung 19).



**Abbildung 19: VAVF-HMI für die Darstellung des kooperativen Fahrstreifenwechsels** (© IAV/SAENA)

Im ersten Schritt wurde das Konzept 1 MMI (Abbildung 20) des VAVF der IAV durch TU Chemnitz evaluiert. Die Usability dieses HMI-Konzepts wurde von der TU Chemnitz in einer Nutzerstudie geprüft. Die insgesamt 21 Probanden saßen dabei auf dem Fahrersitz eines Versuchsträgers und sollten während des Betrachtens der Simulationsvideos auf einem Tablet (Manöverscreen-Mockup) alle Gedanken dazu laut äußern (Think Aloud-Methode, [15]), insbesondere was die Bedeutung der dargestellten Symbole und Prozesse betrifft. Mittels Checklisten prüfte der Versuchsleiter auf dem Beifahrersitz die Vollständigkeit und Korrektheit der benannten Inhalte der Anzeige und stellte Nachfragen für nicht berücksichtigte Elemente basierend auf einem standardisierten, adaptiven Interview. Im Anschluss daran wurde mittels standardisierter Fragebögen die Akzeptanz [12], User Experience [16], Ästhetik und Verständlichkeit des Manöverscreens abgefragt. Die

Auswertung der qualitativen Daten (Aussagen der Probanden, Checklisten, Interview) ergab, dass der überwiegende Teil der Symbole aus dem Manöverscreen entweder spontan oder auf Nachfrage richtig benannt wurde. Insgesamt lagen die Ergebnisse der erlebten User Experience im leicht positiven Bereich, was dafürspricht, dass der Manöverscreen sowohl als nützlich als auch als spaßbringend erlebt wurde. Hinsichtlich seiner ästhetischen Aspekte wurde der Manöverscreen darüber hinaus als tendenziell positiv bewertet. Die Ergebnisse zur Bewertung der Systemakzeptanz zeigten dagegen einen deutlichen Optimierungsbedarf. Die Eigenschaften der Anzeige wurden tendenziell negativ beurteilt, d.h. die Nutzer sind eher unzufrieden mit der Anzeige. Im Detail zeigen die Ergebnisse zur Symbolverständlichkeit, dass die Probanden die größten Verständnisprobleme mit dem Einsatzwagen-Symbol sowie bei den Brems- und Beschleunigungspfeilen hatten. Auf Basis der Ergebnisse von Konzept 1 wurden die MMI-Visualisierungen entsprechend angepasst.



**Abbildung 20: MMI-Konzept 1 (links) (© IAV), HUD-Konzept 2 (rechts) (© TU Chemnitz)**

Im zweiten Schritt wurde das Konzept 2 HUD-Mockups durch TU Chemnitz evaluiert. Auf Grundlage der Fokusgruppenergebnisse wurden durch TU Chemnitz zwei Workshops zur Evaluation erster HUD-Mockups mit Experten der Fahrzeugautomatisierung und Usability Experten durchgeführt. Die Zielsetzung dieser Workshops war die Identifikation von Potentialen und Schwächen der HMI-Prototypen. Im Anschluss wurde eine Laborstudie durchgeführt, um die weiterentwickelten HUD-Konzepte prototypisch in einer dynamischen Umgebung hinsichtlich Systemakzeptanz [12], Systemvertrauen [13], Nachvollziehbarkeit und Usability [14] zu testen. Die Aufgabe der insgesamt 23 Probanden war es, die Nutzerschnittstelle mit situationsabhängigen Echtzeitinformationen während einer aufgezeichneten Simulationsfahrt zu betrachten und dabei laut auszusprechen, wie sie die Situation interpretieren und was sie auf der Anzeige sehen (Think Aloud-Methode, [15]). Dabei deckte diese Studie gleichzeitig Arbeiten für AP 5 und AP 6 ab, weil alle Probanden das HUD sowohl aus der VAVF- als auch aus der NAVF-Perspektive evaluierten (within-subject design). Im Unterschied zur VAVF-Bedingung konnten die Probanden in der NAVF-Bedingung zusätzlich ein Lenkrad und die Pedalerie nutzen für den Fall, dass sie mit der präsentierten Fahrt nicht zufrieden waren und selbst anders fahren würden. Im Anschluss an jede Bedingung erfolgte die Fragebogenbearbeitung und ein abschließendes Interview zur Bewertung der HMIs auf Use Case-Ebene. Die Ergebnisse zeigen, dass die Probanden es als grundsätzlich hilfreich empfanden, über bevorstehende Ereignisse informiert zu werden und Informationen zum Kooperationsstatus zu erhalten. Dies spiegelt sich auch in der tendenziell positiv bewerteten Usability und User Experience des HUD in beiden Nutzerperspektiven (VAVF und NAVF) wider. Aus den Angaben im Interview geht jedoch auch hervor, dass einzelne Symbole zur Verbesserung des intuitiven Verständnisses der dargestellten Informationen

angepasst werden sollten. Dies betrifft beispielsweise die Dreiecke am unteren Bildrand, welche Informationen zur Spurauslastung enthalten oder den roten Pfeil, der darüber informiert, dass die Kooperation noch nicht bewilligt wurde. Eine detaillierte Ausführung dieser Studie kann auch dem Konferenzbeitrag [6] entnommen werden. Auf Basis der Ergebnisse von Konzept 2 wurden die Visualisierungen der HUDs entsprechend angepasst.

Durch TU Dresden FZM und IAV wurde die korrekte Funktionsweise für die Model-Predictive-Control (MPC), welche im Projekt REMAS entwickelt wurde, mit Hilfe von Simulationen im Framework und einer nachträglichen Validierung am Testkorridor im Kontext von HarmonizeDD nachgewiesen. Diese wurde in das Echtzeitframework den Versuchsträger von IAV integriert. Die Einbindung und das systemspezifische Verhalten von SPATEM/MAPEM in Bezug auf die MPC ist mit Hilfe des Simulations-Frameworks aus AP 1 abgesichert. Dazu wurde das dafür notwendige mathematisch/technische Modell für die automatisierte KFZ-Längsregelung in das Echtzeitframework von IAV integriert. In einem nächsten Schritt wurde die automatisierte Umschaltung zwischen der freien Regelung (MPC) und dem bereits im Versuchsträger vorhandenem Full Speed Range ACC adaptiert.

Weiterhin wurde ein Prüffeld für autonome Fahrfunktion durch TU Dresden FZM zur Verfügung gestellt. Dies berücksichtigt die baulichen Anforderungen (im Wesentlichen plane Versuchsfläche mit stetigen Neigungsübergängen, Trennung Sicherheitsbereich, Fahrdynamikanforderungen auf Basis Fahrscenarien HarmonizeDD). Vor Fertigstellung wurden die Funktionstests auf dem Flugplatz Litten bei Bautzen durchgeführt. Fahrversuche mit realen Fahrzeugen im Kontext der GLOSA-Entscheidungsmechanismen wurden dabei erfolgreich absolviert.

## 2.6 Assistenzfunktionen für NAVF (AP 6)

Die wesentlichen Ergebnisse des AP 6 sind die Entwicklung und Umsetzung der Assistenzfunktionen inkl. MMI und Kommunikationsfunktion, die es menschlichen Fahrern ermöglichen, das Fahrverhalten von NAVF aufgrund von Fahrempfehlungen und Informationsdiensten besser nachzuvollziehen, gezielter interagieren zu können sowie effektiv zu kooperieren.

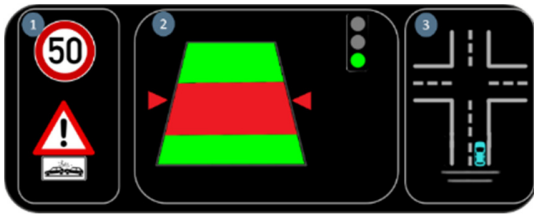
Die zentralen Arbeitsschritte zum Erreichen der nachfolgend beschriebenen Ergebnisse waren:

- MMI-Konzept NAVF & Usability (BMW, Noritel, Preh Car Connect, TU Chemnitz)
- Assistenzfunktionen für Bestandsfahrzeuge (BMW, Noritel, Preh Car Connect, Fraunhofer IVI, TU Chemnitz)
- Assistenzfunktionen für Neufahrzeuge (Preh Car Connect, Fraunhofer IVI, TU Chemnitz)

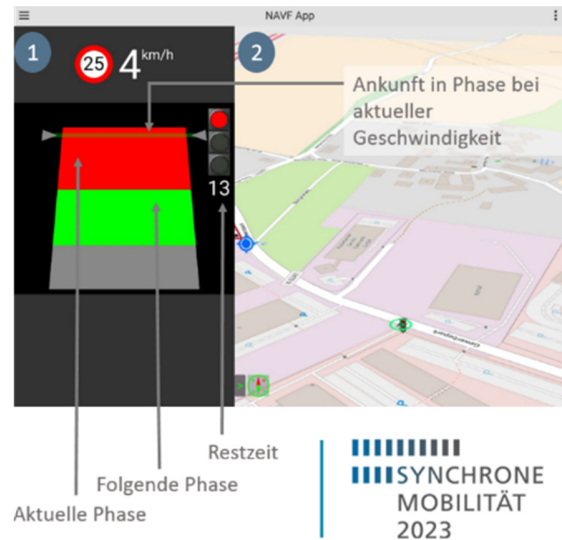
In einem ersten Schritt wurde ein übergreifendes **MMI-Konzept für NAVF** erarbeitet sowie dessen **Usability** bewertet. Die Ergebnisse wurden anschließend in das spezifische MMI-Konzept für Nachrüstsets der Bestandsfahrzeuge (HUD/App) sowie Fahrzeug-Infotainmentsysteme von Neufahrzeugen überführt.

Für das Bestandsfahrzeug hat die Firma Noritel ein HUD (siehe Abbildung 21) und Preh Car Connect für das Neufahrzeug eine seriennahe Head-Unit auf Android-Basis (siehe Abbildung 22) konzeptioniert. BMW unterstützte bei der Erstellung der MMI Konzepte. Für beide Ausprägungen sind zwei neuartige HMI-Konzepte entwickelt und im Anschluss mit Hilfe der TU Chemnitz hinsichtlich Bedienbarkeit und Akzeptanz evaluiert worden. Diese Konzepte decken die besonderen Anforderungen an V2X-Nachrichten und der Kommunikation im Mischverkehr zwischen automatisierten und nicht-automatisierten Fahrzeugen ab.





**Abbildung 21: Aufbau des HMI-Konzeptes für das HUD**  
(© Preh Car Connect)

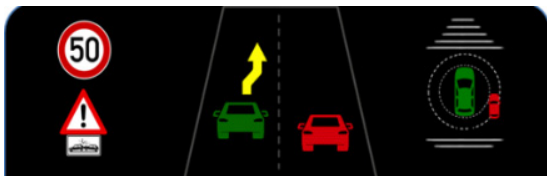


**Abbildung 22: Aufbau des HMI-Konzeptes für Android**  
(© Preh Car Connect)

Für das HMI der jeweiligen Ausstattungsvariante wurde von Preh Car Connect ein Konzept erstellt, welches die jeweiligen Besonderheiten und Anforderungen berücksichtigt. Das HUD ist durch seine Auflösung und geringe Darstellungsfläche (360 x 112 Pixel) limitiert, sodass die Symboliken und darzustellenden Informationen übersichtlich und schnell verständlich angeordnet sein müssen. Dafür ist eine Drei-Teilung vorgesehen (siehe Abbildung 21). Auf der linken Seite ist eine aktuelle Status-Meldung mit Verkehrszeichen angeordnet, welche die zurückliegenden, aber noch relevanten Ereignisse anzeigt (Strecken-Höchstgeschwindigkeit, Vorfahrtsregelung, Baustelle, Stau, etc.). In der Mitte werden die aktuellen V2X-Informationen zu dem jeweiligen Use Case mit der Handlungsempfehlung an den Fahrer des NAVF oder die aktuelle Situation dargestellt. Auf der rechten Seite ist eine sogenannte Radar-Ansicht angeordnet, welche die Ego-Fahrzeugumgebung mit anderen Verkehrsteilnehmern darstellt.

Für das HMI auf Android-Basis (siehe Abbildung 22) gelten im Hinblick auf Auflösung und Darstellungsfläche weniger Restriktionen. So wurde das Konzept von einem dreiteiligen auf einen zweiteiligen Ansatz reduziert. Dabei befindet sich auf der linken Seite der sogenannte Event-View, indem alle eingehenden SPATEM-Nachrichten entsprechend visualisiert werden. Auf der rechten Seite befindet sich der Map-View, bei dem auf einer großen Kartenansicht (Grundlage: Open Street Map) alle V2X-Objekte (Fahrzeuge, Infrastruktur, Baustelle etc.) angezeigt werden.

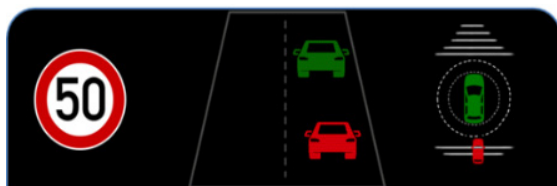
In Abstimmung zwischen den Projektpartnern wurden Beispielsymboliken für die Darstellung auf dem Display erstellt und evaluiert, um einen finalen Zeichensatz und das spätere HMI zu spezifizieren. Nutzerstudien zur Konzeption bzw. Akzeptanz der HMIs wurden von der TU Chemnitz durchgeführt (siehe Abbildung 23). Die Ergebnisse der Studien konnten genutzt werden, um die HMIs im Sinne eines nutzerzentrierten Entwicklungsprozesses weiter zu optimieren. Konkret wurden notwendige bzw. fakultative Informationselemente definiert. Weiterhin wurden Kommunikationsfunktionen umgesetzt, um Informationen mit anderen Fahrzeugen bzw. Infrastrukturelementen auszutauschen.



(a) Fahrstreifenwechsel steht bevor,



(b) Fahrstreifenwechsel steht bevor,



(c) Fahrstreifenwechsel abgeschlossen

Abbildung 23: Storyboard für den Use Case "kooperativer Fahrstreifenwechsel" (© Noritel)



Abbildung 24: Beispielscreen der Anzeige (Mitte unten) im Fahrzeug aus der Fahrerperspektive (© TU Chemnitz)

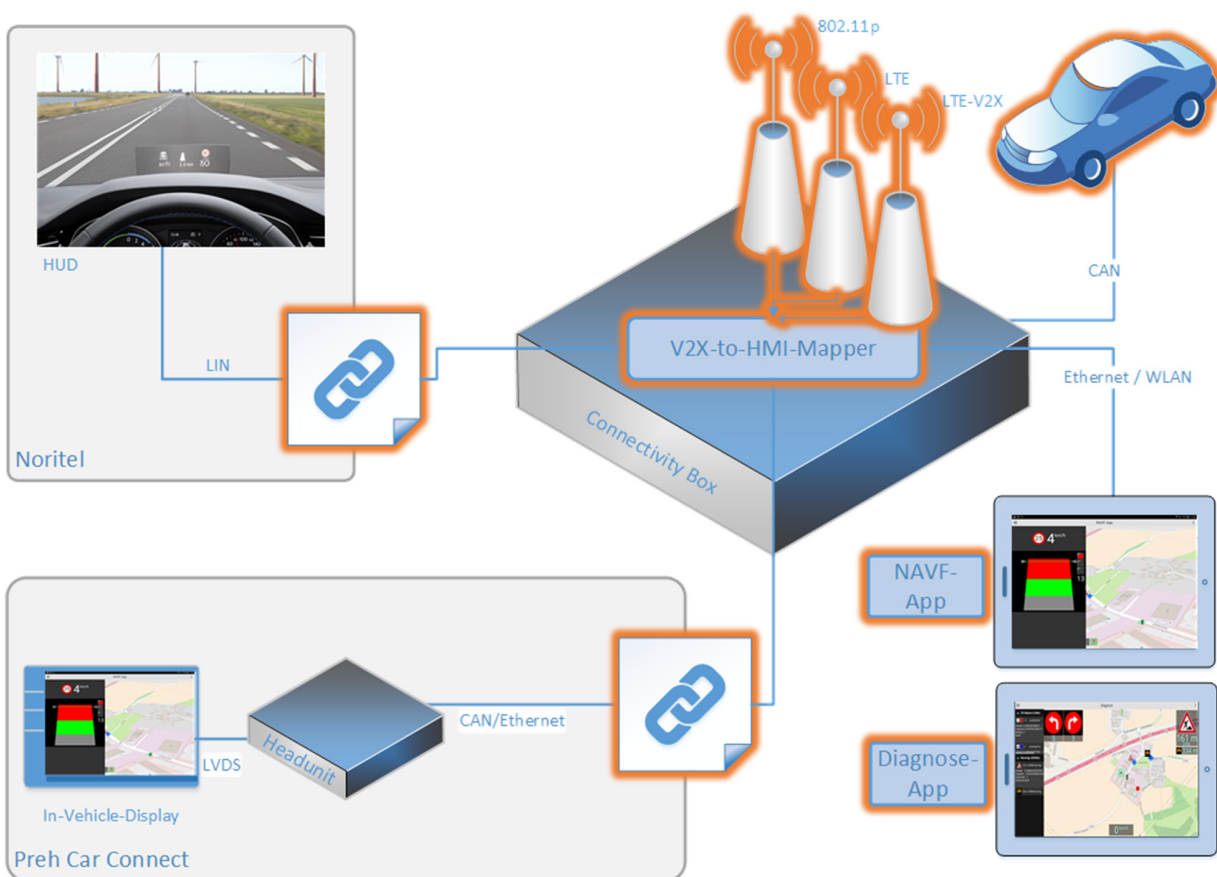
Weiterführend erfolgte eine umfassende Laborstudie auf Basis aufgezeichneter Videos mit realen Szenarien, deren Ziel es war, zu prüfen, ob die Anzeige von Restdauern von Grünphasen zu angepasstem und effizienterem Fahrverhalten führt (siehe Abbildung 24). Dabei wurde der Einfluss verschiedener LSA-Phasen-Restzeiten für Grün und Rot (1s, 2s, 3s, 4s, 5s) und deren Anzeigeorte (im Fahrzeug vs. an der Ampel vs. im Fahrzeug und an der Ampel) auf Time-to-Arrival (TTA)- und Querungs (Q)-Urteile untersucht. Es zeigte sich, dass der Anzeigeort weder einen Einfluss auf die Q- noch auf die TTA-Urteile hatte. Der häufig gefundene Effekt der Unterschätzung der TTA konnte auch in dieser Studie gezeigt werden; die Probanden ( $N = 37$ ) erwarteten das Fahrzeug also früher an der LSA als es dort tatsächlich ankommt. Daraus leitet sich die Empfehlung ab, die reine Fahrerinformation um konkrete Handlungsempfehlungen zu ergänzen, um das Potential der Effizienzsteigerung des Verkehrsflusses mithilfe der Restzeitanzeigen optimal auszuschöpfen. Die Studienergebnisse flossen in die Diskussion zur Gestaltung der Anzeigen für NAVF ein. Es wurden Warnkaskaden und Anzeigezeiten prototypisch definiert sowie sicherheitsrelevante Aspekte wie Ablenkungswirkungen oder Fehlinterpretationen geprüft.

Die Arbeiten zu den **Assistenzfunktionen für Bestandsfahrzeuge und Neufahrzeuge** beinhalteten die Entwicklung und Integration der HMI inkl. der entsprechenden Funktionalität. Mit den entwickelten Assistenzfunktionen für den Fahrer eines NAVF konnte das Fahrverhalten eines VAVF nachvollzogen werden. Hierbei wird von Informationen der Infrastruktur oder Mobile Cloud profitiert. Die Ausstattung entstand dabei in zwei Ausprägungen:

- Nachrüst-Set für Bestandsfahrzeuge (Noritel)
- Ausstattungsvariante für Neufahrzeuge (Preh Car Connect)

Preh Car Connect erweiterte die Funktionsbausteine mittels der Fahrzeuganbindung über die CAN-Schnittstelle, um u.a. auch den Status des Fahrtrichtungsanzeigers übermitteln zu können. Abbildung 25 zeigt das Systemkonzept der Assistenzfunktionen für den menschlichen Fahrer für unterschiedliche Ausstattungsvarianten. Als zentrales Element im Fahrzeug diente die u.a. mit einem IEEE WLAN 802.11p und LTE Modul ausgerüstete Connectivity-Box von Preh Car Connect. Die Connectivity-Box hat folgende System-Schnittstellen:

- CAN-Vernetzung an die interne Fahrzeugvernetzung
- Ethernet-Schnittstelle zur Infotainment-Head-Unit
- WLAN-Schnittstelle zum externen Android-Endgerät
- LIN-Schnittstelle zu HUD



**Abbildung 25: Assistenzfunktionen für den menschlichen Fahrer** (© Preh Car Connect)

Somit können Bestandsfahrzeuge mit beiden Ausstattungsvarianten (HUD, externes Android Endgerät) nachgerüstet und Neufahrzeuge mit der integrierten Head-Unit ausgerüstet werden. Die innerhalb der Projektlaufzeit entwickelte und in Betrieb genommene Connectivity-Box konnte erfolgreich an die Partner übergeben und kooperative Testfahrten durchgeführt werden.

Im Zuge der Bereitstellung des HUD und der Implementierung der Use Cases entwickelte Noritel eine Software zur Anpassung der Anzeigen und zum Positionieren der Symbole. Auf Basis eines entwickelten Prototyps wurden

weitere Geräte produziert. Anschließend wurden erste Testgeräte an den Projektpartner Preh Car Connect geliefert. Auf dem Speicher der Geräte sind alle benötigten Symboliken der Use Cases hinterlegt. Das Testgerät konnte erfolgreich an die Connectivity-Box angeschlossen werden. Eine Demo-Software wurde programmiert, mit welcher die Funktionalitäten getestet wurden. Mit Hilfe der bereitgestellten Steuerungs- und Positionierungssoftware konnten die Symbole aufgerufen und alle ausgewählten Use Cases modelliert werden. Zur Integration des HUD wurde an der Connectivity-Box der LIN-Bus als weitere Schnittstelle implementiert.

Die entwickelten Funktionsmuster wurden in die Versuchsträger von Preh Car Connect und Fraunhofer IVI integriert, entsprechende Schnittstellen bereitgestellt bzw. adaptiert und umfangreich getestet. Darüber hinaus wurden die Partner von BMW bei der Ausrüstung mit den entwickelten Funktionsmustern unterstützt. Fraunhofer IVI implementierte die Preh Connectivity-Box in den projektextern beschafften VAVF und schaffte die Voraussetzung für die Visualisierung der verkehrlichen Anwendungen, indem die entsprechenden Schnittstellen und Services fahrzeugseitig und backendseitig bereitgestellt wurden.

Für das HMI wurden alle relevanten Use Cases implementiert. Dazu zählen der UC1 „Kooperativer Fahrstreifenwechsel“, UC2 „Kooperatives Abbiegen“ und UC3 „Vorausschauende Längsführung“ (siehe Abbildung 23). Für die weiteren Use Cases UC4 „Vorausschauende Fahrstreifenwahl“, UC5 „Synchrones Anfahren“ waren keine Implementierungen im HMI geplant, da diese durch die TU Dresden VLP rein simulativ evaluiert wurden.

Für den UC1 „Kooperativer Fahrstreifenwechsel“ und UC2 „Kooperatives Abbiegen“ wird das neu entwickelte V2X Format MCM (Maneuver Coordination Message) genutzt. Diese Botschaft überträgt mit Hilfe der Fahrzeugvernetzung den Blinker-Status als Indikator für das Aussenden des Manöverwunsches. Mit dem entwickelten HMI für den UC1 können alle drei Zustände der MCM-Botschaft visualisiert werden (Abbildung 26). So wird zwischen „Lücke bilden“, „Lücke halten“ und „Kooperation erfolgreich“ unterschieden. Parallel dazu symbolisieren die Grafiken den aktuellen Zustand auf der Straße, in dem die relative Positionierung der Fahrzeuge zueinander auf der Straße angezeigt wird. Die Pfeile symbolisieren den jeweiligen Zustand. Bei Rot ist die Lücke zu klein und bei Grün ist die Lücke für den Fahrstreifenwechsel hinreichend groß. Zusätzlich werden über die MCM die benötigten Werte für die Lückenbildung übertragen. Somit erhält der Fahrer Kenntnis mittels Balkendarstellung über den aktuellen und den benötigten Abstand. Durch die implementierte Fahrzeugvernetzung und die HMI-Oberfläche ist es möglich, nicht nur als NAVF die MCM vom VAVF zu empfangen, sondern die MCM auch selbst zu erzeugen und zu verschicken. Dafür wird entweder der Blinker als Auslöser oder eine Nutzerinteraktion innerhalb der Android-Applikation genutzt.

Für den UC3 „Vorausschauende Längsführung“ wurde eine neuartige, innovative Darstellung entwickelt. Diese Darstellung nutzt die Informationen der Lichtsignalanlage (LSA) (SPATEM, MAPEM) sowie der Prognosen von VAMOS zur Restlaufzeit der aktuellen Phase, um dem Fahrer leicht verständlich zu zeigen, welche Phase dieser bei Fortführung seiner aktuellen Geschwindigkeit erreichen wird. Dabei wird unter Berechnung des Abstandes des Fahrzeuges zur LSA anhand eines farbige-vertikal verlaufenden Balkens der Ankunftszeitpunkt innerhalb der Phase dargestellt. Die aufeinanderfolgenden Phasen werden anhand der Laufzeiten „übereinander“ gestapelt und laufen in Fahrtrichtung vertikal weiter. Analog dazu bewegt sich der Pfeil zur Darstellung des Ankunftszeitpunktes anhand der aktuellen Geschwindigkeit und des Abstandes zur LSA. Somit kann der Fahrer leicht erkennen, inwiefern eine Geschwindigkeitsanpassung das Erreichen einer anderen Phase bewirkt.



Abbildung 26: HMI NAVF (© Preh Car Connect)

## 2.7 Feldtests & Evaluierung (AP 7)

Die wesentlichen Ergebnisse des AP 7 sind die Evaluierung und der Test der entwickelten Funktionsmuster, welche in den vorherigen Kapiteln beschrieben wurden, im Digitalen Testfeld Dresden bzw. mit Hilfe der Simulation.

Die zentralen Arbeitsschritte zum Erreichen der nachfolgend beschriebenen Ergebnisse waren:

- Vorbereitung der Feldtests  
(BMW, IAV, MUGLER, Preh Car Connect, Vodafone, Fraunhofer IVI, TU Chemnitz, TU Dresden)
- Durchführung der Feldtests  
(IAV, MUGLER, Preh Car Connect, Vodafone, Fraunhofer IVI, TU Chemnitz, TU Dresden)
- Evaluierung  
(IAV, MUGLER, Preh Car Connect, Vodafone, Fraunhofer IVI, TU Chemnitz, TU Dresden)
- Bewertung IVS-Infrastruktur aus Betreibersicht (Fraunhofer IVI)

Im Zuge der **Vorbereitung der Feldtests** erfolgte einerseits die umfassende Versuchsplanung, andererseits wurde die Testumgebung entsprechend aufbereitet und konfiguriert, um die geplanten Versuche durchführen zu können. Fraunhofer IVI führte federführend die Beiträge zur Planung der Feldtests der Partner sowie die Ergebnisse der Entwicklungen der zuvor beschriebenen APs zur Definition der Testziele zusammen. Hierzu wurde die bestehende Plattform REMAS genutzt und entsprechend der HarmonizeDD spezifischen Anforderungen bzw. Use Cases adaptiert. Es wurden relevante Testfälle in Abstimmung mit den Projektpartnern spezifiziert und beschrieben. Aufbauend auf den Testfällen wurden die Funktionalitäten der Subsysteme RSU, Mobile Cloud, GeoMessaging, VAMOS, REMAS sowie der VAVF und NAVF inkl. Kommunikation, HMI und Fahrscenarien in ihrer Gesamtheit geprüft und für die Feldtests vorbereitet. Fraunhofer IVI untersuchte spezifisch an die Anforderungen der HarmonizeDD-Testfälle angepasste projektexterne Testplanungs- und Testunterstützungsfunktionen. Eine Reihe von Untersuchungsfahrten wurden mit Hilfe des Tools zur Testplanung erstellt und die darunterliegenden HarmonizeDD-Fahrscenarien mit Hilfe der projektexternen Test App erprobt. Diese App dient der Unterstützung von Testfahrern im NAVF bzw. von Sicherheitsfahrern im VAVF und liefert Informationen zu den Fahrscenarien sowie Aktionspunkten zur Sicherstellung eines effizienten und sicheren Testablaufs

kooperativer Testszenarien im Feld. Die Toolkette ist beispielhaft in Abbildung 27 dargestellt (linke Abbildung: Tool zur Testplanung, rechte Abbildung: App zur Testunterstützung).



Abbildung 27. Testplanung und Testunterstützung (© Fraunhofer IVI)

Die **Durchführung der Feldtests** wurde von Fraunhofer IVI koordiniert und dokumentiert. In Vorbereitung auf die Feldtests wurden die zu testenden vernetzten und automatisierten Fahr- bzw. Subfunktionen in Versuchen in Laborumgebungen und weiterführend auf geschlossenen nichtöffentlichen Testgeländen, z.B. auf dem Fraunhofer IVI Testoval oder auf den Flugplätzen Litten und Jahnsdorf durchgeführt. Neben Teilfunktionalitäten der Use Cases wurden in diesen Tests auch Funktionen erprobt, welche nicht sicher im öffentlichen Straßenverkehr getestet werden konnten bzw. welche zu einer erheblichen Beeinträchtigung im Straßenverkehr geführt hätten. Grundlegend standen im Rahmen des AP 7 Funktions- und Integrationstests im Fokus, die gesamtheitlich die Demonstration der nachfolgend genannten Use Cases (UC) im Feld untersetzten:

- UC1 „Kooperativer Fahrstreifenwechsel“
- UC2 „Kooperatives Abbiegen“
- UC3 „Vorausschauende Längsführung“

Die Use Cases „Kooperatives Abbiegen“ und „Vorausschauende Längsführung“ erforderten neben einer V2V-Kommunikation auch die Vernetzung mit an Lichtsignalanlagen angebotenen RSU. Aus ersten Testreihen wurden Messdaten realer LSA-Daten aufgezeichnet und die Verarbeitung von RSU-seitig versendeten SPATEM und MAPEM in den Kommunikationssystemen in den Versuchsfahrzeugen der Partner auf dem Testgelände des Fraunhofer IVI untersucht. Als Ergebnis konnte eine grundsätzliche Kompatibilität der Kommunikationssysteme zwischen vernetzter Infrastruktur und den Versuchsträgern der Projektpartner aufgezeigt werden. Die Messdaten wurden zudem für die Entwicklung bzw. Weiterentwicklung vernetzter automatisierter Fahrfunktionen verwendet. Entsprechende Kompatibilitätstests wurden darauf aufbauend ebenfalls auf den Testkorridoren des Digitalen Testfelds Dresdens durchgeführt. Als Ergebnis konnte die Kompatibilität der V2I-Kommunikation aller projektbeteiligter Versuchsträger mit der vernetzten Infrastruktur im digitalen Testfeld aufgezeigt werden. Zusätzlich ergaben Untersuchungen zur V2V-Kommunikation zwischen den Versuchsträgern der Projektpartner eine grundlegende Interoperabilität der Kommunikationssysteme zwischen allen beteiligten Versuchsfahrzeugen.

In einer Reihe von Testsessions wurde die V2X-Kommunikation zwischen vernetzter Infrastruktur bzw. vernetzten Versuchsfahrzeugen über heterogene Kommunikationstechnologien erprobt. Initial fanden

Erprobungen über IEEE WLAN 802.11p sowie über GeoMessaging im Mobilfunknetz von Vodafone statt. Im Rahmen der Evaluationen konnte die Funktionalität vernetzter Fahrfunktionen über beide Kommunikationstechnologien aufgezeigt werden. In mehreren großangelegten Testreihen wurden mit einer Vielzahl beteiligter Versuchsfahrzeuge der Projektpartner Fraunhofer IVI (2x NAVF sowie 1x VAVF), IAV (2x VAVF), Preh Car Connect (1x NAVF) und TU Dresden (2x NAVF) beide Kommunikationstechnologien gesamtheitlich in einem heterogenen Kommunikationssystem erprobt. Damit konnte u.a. aufgezeigt werden, dass die im Projekt erprobten vernetzten Fahrfunktion sowie die Dienste der vernetzten Infrastrukturen grundsätzlich technologie-neutral hinsichtlich der verwendeten Kommunikationstechnologie wirken können. Bedingt durch die späte Verfügbarkeit der Hardware für C-V2X Kommunikationstechnologie am Markt, konnte die Evaluation der vernetzten Fahrfunktionen über diese Technologie erst nach der Bereitstellung von prototypischen C-V2X Modulen durch Vodafone in 2019 am Projektende von Fraunhofer IVI, Vodafone und MUGLER durchgeführt werden. Hier konnte ebenfalls eine grundsätzliche Interoperabilität aufgezeigt werden.

Gemeinsam mit der Erprobung verschiedener Kommunikationstechnologien wurden vernetzte und automatisierte Fahrfunktionen zur Umsetzung der Use Cases im digitalen Testfeld evaluiert. Die Evaluation fand über mehrere Testsessions mit sich steigerndem Komplexitäts- und Funktionsgrad statt. Beispielsweise wurde die GLOSA-Applikation zunächst über IEEE WLAN 802.11p und geringen Latenzzeiten erfolgreich getestet, bevor die Applikation auf das stärker mit Latenzen behaftete Mobilfunknetz appliziert und infolge der Synchronisationsalgorithmen ebenfalls erfolgreich getestet werden konnte.

Bereits 2018 konnte der UC1 „Kooperativer Fahrstreifenwechsel“ aus HarmonizeDD anfangs zwischen NAVF und dann mit steigender Komplexität 2019 zwischen NAVF/VAVF und 2019/2020 zwischen VAVF erfolgreich im Digitalen Testfeld Dresden demonstriert werden. Im weiteren Projektverlauf fanden regelmäßig partnerübergreifende Feldtests statt, um die Funktionalitäten iterativ zu erweitern und zu testen. Der iterative Prozess bildete zunächst die Kommunikation zwischen zwei NAVF ab und wurde stufenweise mit den Interaktionen NAVF/VAVF bis hin zu VAVF/VAVF inkl. der Implementierung der automatisierten Fahrfunktion erweitert (siehe Abbildung 29).

In einem ersten übergeordneten V2X-Funktionstest in 2018 wurden V2X-Nachrichten des Fahrzeugs bzw. der Infrastruktur live auf dem Testgelände des Fraunhofer IVI aufgezeichnet, sodass u.a. reale LSA-Daten für die Simulation und Entwicklung der AD-Funktionen der IAV genutzt werden. Zudem wurde auf diese Weise eine erste Interoperabilität zwischen den Kommunikationssystemen unterschiedlicher Projektpartner sichergestellt. Im Verlauf des Projektes wurden zahlreiche V2X-Testfahrten auf dem Digitalen Testfeld Dresden durchgeführt. Während des Testbetriebs wurden ständig Verbesserungspotentiale der Fahrfunktionen identifiziert, umgesetzt und erneut in die Testprozedur eingeführt. Im Zuge der ersten Demonstrationen bezüglich des vernetzten Fahrens waren die Versuchsträger der Partner Fraunhofer IVI (2x NAVF sowie 1x VAVF), IAV (2x VAVF), Preh Car Connect (1x NAVF) und TU Dresden (2x NAVF) beteiligt (siehe Abbildung 28). Es wurden Kommunikationstests für IEEE WLAN 802.11p und GeoMessaging durchgeführt. Durch die späte Verfügbarkeit der Hardware von C-V2X am Markt konzentrierten sich Performancemessungen zunächst auf die Kommunikation mit IEEE WLAN 802.11p und umfasste die Partner Fraunhofer IVI, IAV, Preh Car Connect, TU Dresden und MUGLER. Nach der Bereitstellung von prototypischen C-V2X Modulen durch Vodafone in 2019 konnten entsprechende Tests am Projektende von Fraunhofer IVI, Vodafone und MUGLER durchgeführt werden. Für die Kommunikationstests wurden weiterführend von einer Test-RSU (MUGLER) RTCMEM-Nachrichten versendet, welche die GNSS Korrekturdaten enthielten. Die Projektpartner konnten diese Nachrichten empfangen und zur Korrektur der Ego-Position nutzen.

Mit Hilfe der integrierten Kommunikationstechnologien wurden Messungen zu Reichweiten- und Empfangsqualitätsmessungen durchgeführt (Fraunhofer IVI). Im Ergebnis konnte nachgewiesen werden, dass für die definierten Use Cases die Kommunikationsreichweiten im latenzkritischen Bereich über IEEE WLAN 802.11p ausreichen. Die Hybride Kommunikation über Mobilfunk und Geomessaging erweitert die Kommunikationsreichweite zur Umsetzung der Use Cases in weniger zeitkritischen Bereichen.

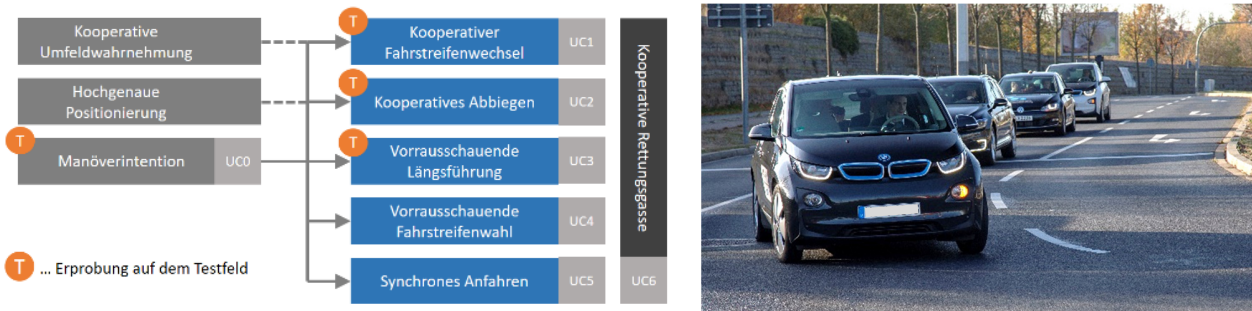


Abbildung 28: Use Cases und Demo Digitalen Testfeld Dresden (© Fraunhofer IVI)

Bereits 2018 konnte der UC1 „Kooperativer Fahrstreifenwechsel“ aus HarmonizeDD erfolgreich im Digitalen Testfeld Dresden demonstriert werden. Im weiteren Projektverlauf fanden regelmäßig partnerübergreifende Feldtests statt, um die Funktionalitäten iterativ zu erweitern und zu testen. Der iterative Prozess bildete zunächst die Kommunikation zwischen zwei NAVF ab und wurde stufenweise mit den Interaktionen NAVF/VAVF bis hin zu VAVF/VAVF inkl. der Implementierung der automatisierten Fahrfunktion erweitert (siehe Abbildung 29).



Abbildung 29: UC1 „Kooperativer Fahrstreifenwechsel“ (NAVF/VAVF) – Digitalen Testfeld Dresden (© SAENA)

Ab 2018 wurde ebenfalls der UC2 „Kooperatives Abbiegen“ implementiert und getestet. Im Rahmen des Projekts konnte die Kooperation dieses UC zwischen zwei NAVF (TU Dresden, Fraunhofer IVI) im Bereich einer wenig befahrenen Kreuzung im Digitalen Testfeld Dresden demonstriert werden (Abbildung 30). Eine Basisimplementierung konnte zu Projektende zwischen zwei VAVF (Fraunhofer IVI, IAV) initial getestet werden.





**Abbildung 30: UC2 "Kooperatives Abbiegen" (NAVF/VAVF) – Testoval/Testkreuzung (© IVI/SAENA)**

Der UC3 „Vorausschauende Längsführung“ wurde ab 2018 im Realverkehr des Digitalen Testfeld erprobt. Dabei wurden die von der Infrastruktur zur Verfügung gestellten Daten proaktiv in der Fahrstrategie der automatisierten Fahrfunktion (VAVF) bzw. innerhalb der Visualisierung/HMI (NAVF) berücksichtigt. Beispielhaft wird in Abbildung 31 eine Testfahrt zweier VAVF (IAV, Fraunhofer IVI) gezeigt.



**Abbildung 31: UC3 "Vorausschauende Längsführung" (NAVF/VAVF) – Digitalen Testfeld Dresden (© Fraunhofer IVI)**

Nicht alle UC konnten aus technischen Gründen und aus Gründen der Gewährleistung der Verkehrssicherheit im Digitalen Testfeld Dresden vollumfänglich getestet werden. UC4 bis UC6 wurden daher simulativ durchgeführt. Mithilfe realer Testdaten der VAVF (Fraunhofer IVI/IAV) konnten in der Simulation die Funktionskomponenten kalibriert werden. Zu diesen Zwecken stellte IAV interessierten Partnern Testdaten (durch die Fahrzeugsensorik erkannte Objekte und auch Kenngrößen der Zustände der Fahrzeugeigenbewegung) zur Verfügung. Die Daten wurden aus einer aufgezeichneten Testfahrt auf dem Testkorridor extrahiert. Weiterhin wurden Tests auf geschlossenen Prüfgeländen durchgeführt. Beispielhaft ist die für UC5 „Synchrones Anfahren“/Platooning in Abbildung 32 aufgezeigt. Die Fahrt auf dem Prüfgelände ermöglichte erstmals die Evaluierung von Abständen im Platoon unterhalb der gesetzlichen Mindestabstände. Mechanismen zum Abgleich der ACC- und Beschleunigungsparameter konnten so erfolgreich evaluiert werden. Zur Evaluation des Use Cases „Synchrones Anfahren“ wurden über eine RSU simulierte Signalzustände in die VAVF übertragen. So war es möglich die Reaktionszeiten der Fahrzeuge auszuwerten und im Ergebnis die prinzipielle Eignung von WLAN IEEE 802.11p für die Umsetzung dieses Use Case in der automatisierten Fahrfunktion nachzuweisen.



Abbildung 32: UC5 "Synchrones Anfahren"/Platooning (Testfahrt VAVF) – Flughafen Jahnsdorf (© Fraunhofer IVI)

Im Zuge der **Evaluierung** erfolgte die Analyse der Ergebnisse der Feldtests und Versuchsfahrten hinsichtlich der Forschungsfragen sowie die Bewertung der gesamtverkehrlichen Wirkungen der entstandenen Dienste und Funktionen. Zur Koordinierung führte Fraunhofer IVI die Beiträge zur Auswertung der Feldtests der Projektpartner zusammen.

IAV evaluierte die bereitgestellten hochautomatisierten Fahrfunktionen des VAVF und identifizierte Verbesserungspotential im Mischbetrieb im urbanen Umfeld. Fraunhofer IVI analysierte die Feldtests hinsichtlich der Konnektivität, Zuverlässigkeit der Verbindung und deren Leistungsfähigkeit in Hinblick auf bestehende und zukünftige automatisierte Fahrfunktionen. TU Dresden VLP nutzte die Ergebnisse der durchgeführten Feldtests sowie die Rückmeldungen der Projektpartner im Zuge der Evaluierung, um diese anhand von mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen zu vergleichen und die Güte der Prognose von Schaltzeiten und Rückstaulängen zu verbessern, um somit die Güte der entwickelten Verfahren iterativ zu steigern. Fraunhofer IVI führt Mikrosimulationen zur Evaluierung der Fahrmanöverempfehlungen (MRM) als Funktion der RSU durch. MUGLER nutzte die Ergebnisse der Feldtests zur Evaluierung der RSU-Funktionstüchtigkeit sowie zum Funktionstest der Schnittstellen. Preh Car Connect evaluierte auf Basis der Daten die Konnektivität des NAVF mit Fokus auf die definierten Use Cases. Die Funktionsfähigkeit und Schnittstellen der Mobile Cloud wurden durch Vodafone auf Basis der Daten der Feldtests evaluiert. Ebenfalls wurde von Vodafone ein grafisches V2X-Cockpit (Abbildung 33) zur Anzeige dynamischer (Echtzeit) und aufgezeichneter verkehrsrelevanter V2X-Nachrichten integriert.



Abbildung 33: Beispiel für die Ansicht im V2X Cockpit (© Tactilo GmbH)

Über dieses Cockpit können Nachrichten über den Zeitraum eines verkehrlichen Szenarios hinsichtlich Anzahl, Typ der Nachricht, Latenz etc. dargestellt werden. Das Cockpit bietet außerdem auch die Darstellung der

Nachrichten in Relation zum Ort des Auftretens. Im Ergebnis konnten Messfahrten hinsichtlich der V2X-Kommunikationsqualität in Echtzeit evaluiert werden.

Ein weiteres Ziel von AP 7 war es, die entwickelten Ansätze für die Nutzerschnittstellen des NAVF-Fahrens im Mischverkehr unter realen Bedingungen zu erproben und erneut zu evaluieren. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Testreihen für den UC1 „Kooperativen Fahrstreifenwechsel“ durchgeführt. Im Rahmen dieser Testreihen wurde durch TU Chemnitz mit Unterstützung von Fraunhofer IVI eine Nutzerstudie zur Evaluation eines von Preh Car Connect entwickelten Prototyps für das HMI des NAVF durchgeführt (siehe Abbildung 26). Während der Testreihen wurden mehrere Fahrstreifenwechsel realisiert, bei denen sich die VAVF (Fraunhofer IVI & IAV) automatisiert auf den Fahrstreifen vor einem NAVF (Preh Car Connect, Fraunhofer IVI, TU Dresden) einordneten, nachdem das Manöver zwischen den Fahrzeugen abgestimmt wurde. Aus organisatorischen Gründen erfolgte die Rekrutierung von insgesamt 10 Probanden für die Nutzerstudie aus dem HarmonizeDD-Konsortium. Nach der Testfahrt fand ein standardisiertes Kurzinterview statt, das die Verständlichkeit sowie Vor- und Nachteile des Anzeigekonzepts erfragte. Zusätzlich wurden mittels computergestützter Befragung Aspekte wie Usability und Akzeptanz der Anzeige erfragt. Die Ergebnisse zur eingeschätzten Usability des HMI zeigten marginale bis akzeptable Werte – das HMI wurde also als geeignet eingeschätzt, bietet aber gleichzeitig Potential für Verbesserungen. Die globalen Einschätzungen zur User Experience lagen in einem neutralen Bereich. Die Subskalen zeigten differenzierte Ergebnisse: Die pragmatische Qualität, die auf eine effektive und effiziente Aufgabenerledigung abzielt, liegt in einem neutralen bis positiven Bereich. Die Werte der Subskala Hedonische Qualität, die die Kreativität und den Spaß-Faktor des HMIs abfragt, lag hingegen klar in einem neutralen Bereich und deuten damit auf ein Optimierungspotential des HMI des NAVF hinsichtlich dieses Aspekts hin. In den Interviews wurden die Einfachheit und Klarheit der Darstellungen besonders positiv hervorgehoben. Die Platzierung der Anzeige in der Mittelkonsole des Fahrzeugs wurde jedoch als nachteilig, teilweise auch als beanspruchend empfunden. Eine Darstellung in einem HUD wird deutlich bevorzugt. Zudem äußerten sich die Nutzer in den Interviews dahingehend, dass Handlungshinweise im HMI klarer formuliert werden müssten. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss beachtet werden, dass es sich um eine eher kleine Anzahl von Teilnehmern handelt, die sehr vertraut sind mit dem Thema des VAVF.

Die TU Dresden FZM entwickelte im Rahmen von AP 7 einen Versuchsträger (kombinierter Funktionserprober und Targetfahrzeug). Der Fokus lag dabei auf der Bereitstellung einer portablen und generischen Lösung, welche es ermöglichte Algorithmen der Projektpartner gefahrenlos testen und evaluieren zu können. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde ein detailliertes Fahrzeugmodell erstellt und virtuell auf dem Korridor simuliert. Ziel war es, sicherzustellen, dass die geforderten Rahmenbedingungen wie bspw. Reichweite, Beschleunigung und Endgeschwindigkeit eingehalten werden um ein reales Abbilden im weiteren Projektverlauf zu ermöglichen. Für das elektrisch angetriebenen automatisierte Kart wurde eine Bauteilauswahl im Rahmen der Aktorik, der dazu passenden Leistungselektronik, der Steuerungsplatinen und der Sensorik getroffen. Im Rahmen der Fahrzeugintegration wurden Herausforderungen bezüglich der Synchronisierung einzelner technischer Prozesse und kritische Latenzzeiten identifiziert und adressiert. Die messtechnischen Versuche am Versuchsträger zeigen, dass das überarbeitete Grundkonzept und die vorgesehene Ansteuerung das Vorhaben ermöglichen. Das System wurde parallel um zusätzliche Fail-Safe Strategien ergänzt, welche ein deterministisches Verhalten im Falle einer Fehlfunktion ermöglichen und den sicheren Zustand (Stillstand) ansteuern. Die Auslegung des Versuchsträgers wurde mit Hilfe des Simulations-Frameworks aus AP 1 durchgeführt. Fahrfunktionen basierend auf den im

Projekt durchgeführte Simulationen bzw. erzielten Erkenntnissen (z.B. bzgl. MPC) konnten in den Versuchsträger integriert werden.

Im Zuge der **Bewertung IVS-Infrastruktur aus Betreibersicht** erfolge die Beschreibung der IVS-Infrastrukturen und IEEE WLAN 802.11p-Dienste aus Sicht des Straßenbetreibers durch Fraunhofer IVI. In einem ersten Schritt wurden die Verantwortlichen sowie die Anforderungen bzgl. der aktuell geltenden rechtlichen Rahmenbedingungen zusammengetragen. Die Versorgungsprozesse der LSA-spezifischen Dienste und Protokolle wurden im Status Quo analysiert sowie notwendige Anpassungen eruiert. Sowohl bei den rechtlichen Rahmenbedingungen für vernetztes Fahren, als auch bei den komplexen Versorgungsprozessen besteht Anpassungs- und Erweiterungsbedarf. In einem zweiten Schritt wurden die Erkenntnisse zu Kosten der V2X-Infrastruktur auf Basis der örtlich spezifischen Randbedingungen zusammengestellt. Eine Übertragbarkeit der allgemeinen Lösungsansätze auf andere Straßenbetreiber ist zwar möglich, aufgrund der sehr unterschiedlichen externen Aspekte, wie bspw. Alter der LSA, Bestimmung der RSU-Standorte, Kommunikationsreichweiten, Zuverlässigkeit der Verbindung etc. sind jedoch immer Einzelfallbetrachtungen notwendig. Gerade bei der Wirtschaftlichkeit der Installation von infrastrukturseitiger Vernetzung bilden oft die Kosten für den Tiefbau eine große Kostenposition, sodass die Installation zukünftig bereits beim Neubau von Lichtsignalanlagen berücksichtigt werden sollte.

### 3 Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung

Innerhalb der Projektlaufzeit gab es gegenüber den Planungen in der Vorhabenbeschreibung einige Änderungen, die im Folgenden beschrieben werden. Einige Anpassungen waren durch inhaltlich-fachliche Erkenntnisse geprägt, andere durch projektpartnerspezifische und organisatorische Gegebenheiten begründet. Die Änderungen während des Projektes führten zu Verzögerungen einiger wesentlicher Arbeiten, wodurch eine Laufzeitverlängerung des Projektes notwendig wurde.

Eine wesentliche Änderung, welche sowohl die Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung des Projekts beeinflusste, war eine Anpassung und substanzielle Reduktion der Arbeiten des Partners BMW, welche durch interne Restrukturierungen begründet waren. Hierbei konnte das ursprünglich geplante VAVF von BMW nicht in das Projekt eingebracht werden. Um die inhaltlichen Arbeiten, insbesondere zur Nutzung von zwei VAVF zu kompensieren, wurde von Fraunhofer IVI ein projektextern beschafftes VAVF in das Projekt eingebracht, entsprechend der Use Cases angepasst sowie in Test- und Demofahrten eingebunden.

Das Institut für Vernetzte Mobilität (IVM) wurde zum 30. Juni 2018 geschlossen und ist somit zu diesem Datum aus dem Projekt ausgeschieden. Die verbleibenden Aufgaben wurden an MUGLER und Fraunhofer IVI übertragen.

Verzögerungen entstanden durch die verspätete Verfügbarkeit von C-V2X Hardware auf dem Markt. Diese wurden über den Partner Vodafone noch vor der offenen Markteinführung beschafft und konnten zum Ende der Projektlaufzeit in das Gesamtsystem integriert werden. Weiterhin kam es zu Verzögerungen bei Vodafone bzgl. der Bereitstellung der GeoMessaging Instanz. Diese konnte durch die Verlängerung der Projektlaufzeit bis zum Projektende integriert werden.

Durch die getroffenen Maßnahmen und Kompensationen konnten die Zielstellungen des Projekts HarmonizeDD erreicht werden. Das Projekt wurde somit erfolgreich abgeschlossen.

## 4 Erreichung der Projektziele

Die Ziele des Projektes HarmonizeDD wurden durch die Entwicklungen der Funktionsmuster erreicht. Hierbei konnte sowohl auf Infrastruktur und Kommunikationsseite die Mobile Cloud als auch die RSU umgesetzt und an das Verkehrsmanagementsystem VAMOS bzw. an REMAS angebunden werden. Die geplanten Vernetzungstechnologien (IEEE WLAN 802.11p, C-V2X sowie Mobilfunk) konnten trotz Lieferschwierigkeiten für das Projekt beschafft und in das Gesamtsystem integriert werden. Auf Fahrzeugseite konnten wesentliche Funktionen für VAVF und NAVF hinsichtlich automatisierungs- und Entscheidungsfunktionen sowie hinsichtlich der HMIs entwickelt, getestet und evaluiert werden.

## 5 FE-Ergebnisse von dritter Seite

Es sind zwischenzeitlich keine FE-Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind.

Die Arbeiten im Forschungsprojekt HarmonizeDD erfolgten in inhaltlicher Abstimmung mit weiteren Projekten der Initiative „Synchrone Mobilität 2023“ im Digitalen Testfeld Dresden.

## 6 Öffentlichkeitswirksame Maßnahmen

Das Forschungsprojekt HarmonizeDD konnte in verschiedenen Formaten öffentlich wirksam präsentiert werden.

Am 14. November 2018 wurden am Flughafen im Rahmen der Veranstaltung »Urbane Testumgebung für automatisiertes und vernetztes Fahren« Zwischenergebnisse aus den Projekten HarmonizeDD, REMAS, SYNCAR, und IVS-KOM der Forschungsinitiative »Synchrone Mobilität 2023« präsentiert. Neben Vorträgen und einer begleitenden Fachausstellung erlebten die Besucher die offizielle Inbetriebnahme des ersten Testkorridors des Digitalen Testfeld Dresden mit fünf Road-Side-Units. Impressionen zur Veranstaltung werden in Abbildung 34 gezeigt.





**Abbildung 34: Zwischenpräsentation “Synchrone Mobilität 2023”** (© Fraunhofer IVI)

Die gemeinsame Abschlussveranstaltung der Projekte HarmonizeDD, REMAS, SYNCAR und AULA fand am 9. Oktober 2019 im Konferenz-Center des Flughafens Dresden statt. Die Ergebnisse der Projekte sowie zum Testfeld Dresden wurden im Rahmen von Vorträgen einem Fachpublikum vorgestellt. Darüber hinaus fand eine Pressekonferenz für interessierte Journalisten statt. Im Zuge von Demofahrten wurden die Ergebnisse des vernetzten und automatisierten Fahrens auf dem Digitalen Testfeld Dresden für eine breite Fachöffentlichkeit greifbar und erlebbar gemacht. Die begleitende Fachausstellung ermöglichte vertiefende Einblicke, z. B. in Testfeld-Backend, RSU, Mobile Cloud, REMAS, VAMOS sowie Geomessaging und Kommunikation oder auch in die Testplanung und das Monitoring der Versuchsfahrzeuge. Impressionen zur gemeinsamen Abschlussveranstaltung werden in Abbildung 35 gezeigt.



**Abbildung 35: HarmonizeDD Abschlussveranstaltung** (© Fraunhofer IVI)

Am 10. & 11. Dezember 2019 fand die ASAM International Conference in Dresden statt. Innerhalb einer eigenen Vortragsession wurde die Forschungsinitiative »Synchrone Mobilität 2023«, wovon HarmonizeDD ein wesentlicher Projektbaustein war, vorgestellt. Auf den angrenzenden Ausstellungsflächen konnten neueste

Technologieentwicklungen für das kooperative und automatisierte Fahren besichtigt werden, die auf dem urbanen digitalen Testfeld Dresden erprobt wurden. Impressionen zur ASAM Konferenz werden in Abbildung 36 gezeigt.



Abbildung 36: ASAM Konferenz (© Fraunhofer IVI)

Darüber hinaus entstanden zahlreiche Veröffentlichungen zu Ergebnissen von Teilaspekten aber auch des Gesamtsystems, welche u.a. bei den entsprechenden Fachkonferenzen präsentiert wurden. In den gemeinschaftlichen Veröffentlichungen [2] und [3] wurde das Gesamtsystem von HarmonizeDD inkl. seiner Einzelkomponenten beschrieben und Erkenntnisse hinsichtlich kooperativer Fahrmanöver insbesondere des UC1 „Kooperativer Fahrstreifenwechsel“ präsentiert. Ergebnisse bzgl. der RSU wurden in [17] bzgl. zuverlässiger Kommunikation in [4] vorgestellt.

### Konferenzbesuche mit Fachvorträgen, Ausstellungen

- 11th International ACM Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, Utrecht, 22.-25. September 2019 (Poster TU Chemnitz)
- 9th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control (AAC 2019) 23.-27. Juni 2019, Orleans, Frankreich (IAV)
- „Mehr Mensch im Verkehr?“, 3. Kongress der Fachgruppe Verkehrspsychologie, Universität des Saarlands, Saarbrücken, 05.-07. März 2019 (Vortrag TU Chemnitz)
- „Co-Simulation of Vehicle, Environment and Traffic Flow for the Development and Testing of Highly Automaten and Connected Vehicles“, ASAM Tagung 2017 (Vortrag TU Dresden FZM)
- „Test vernetzter und hochautomatisierter Fahrfunktionen in Dresden“, 25. Verkehrstechnisches Seminar, Gohrlich, Nov. 2018 (Vortrag TU Dresden)

- Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren 2018, VDI/VDE Gemeinschaftstagung Wolfsburg, Nov. 2018 (Vortrag TU Chemnitz)
- “The impact of green light optimal speed advisory in urban areas from a traffic management perspective”, ITS World Congress, Kopenhagen 2018 (Vortrag TU Dresden)
- 5G Summit 2018, Dresden, 25. September 2018, Präsentation in der Ausstellung (Fraunhofer IVI)
- „Hybride V2X Kommunikationsinfrastruktur“ 2. Deutscher C-ITS-Kongress, Stuttgart, 2018 (Teilnahme Fraunhofer IVI)
- International Transport Forum (ITF) 2018 Summit, 23.-15. Mai 2018 Leipzig: Präsentation des Projektes mittels Plakaten am Stand des Sächsischen Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr (IAV, Fraunhofer IVI)
- TRANS3Net.show, Decin, Mai 2018 (Vortrag und Poster TU Dresden)
- “V2X Communications with Infrastructure Support”, Workshop 5G-XHaul, Dresden, 07. Februar 2018 (Vortrag Fraunhofer IVI)
- Autonomous Driving - Big Testing and Big Data as the Next Challenge (ASAM), Dezember 2017, Ausstellung und Vorträge.
- 24. Verkehrstechnisches Seminar 16.-17.11.2017 in Rathen (Vortrag von TU Dresden)
- 5G Summit 2017, Dresden, 05. September 2017, Präsentation in der Ausstellung (Fraunhofer IVI, Vodafone)

#### **Standardisierungsgremien:**

- 5GAA Treffen, München, Februar 2018 (Teilnahme Vodafone, Fraunhofer IVI)
- ETSI Standardisierungstreffen, Sophia Antipolis, März, Juli, Okt 2018, (Teilnahme Fraunhofer IVI)

#### **Pressemitteilungen:**

- Pressemitteilung der SAENA vom 23.11.2018 zur Durchführung von Demonstrationsfahrten beim Test-Event auf dem digitalen Testfeld Dresden Flughafen im November 2018
- Pressemitteilung der SAENA vom 19.10.2019 zu „Automatisiertes und vernetztes Fahren im Testfeld Dresden –Abschlussevent der Projekte REMAS, HarmonizeDD, SYNCAR und AULA“
- Pressemitteilung der SAENA vom 09.12.2019 zur 4th ASAM International Conference „Autonomous Driving – Standardized Virtual Development as a Key to Future Mobility“



## 7 References

- [1] R. Protzmann, I. Radusch, A. Festag, R. Fritzsche, and M. Rehme, “IV2X Integrierte Betrachtung Fahrzeugkommunikation,” *Sicheres automatisiertes und vernetztes Fahren mit selbstaktualisierenden Karten im Testfeld*, 2018.
- [2] R. Auerswald *et al.*, “Cooperative Driving in Mixed Traffic with Heterogeneous Communications and Cloud Infrastructure,” in *Proceedings of the 5th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*, Heraklion, Crete, Greece, May. 2019 - May. 2019, pp. 95–105.
- [3] Auerswald, R., Dod, M., Franke, L., Fritzsche, R., Haberjahn, M., Jungmann, A., Klöppel-Gersdorf, M., Krems, J.F., Lorenz, S., Neumann, I., Schmalfuß, F., Springer, S., “Heterogeneous Communications and Cloud Infrastructure for Cooperative Driving in Mixed Traffic,” in *(submitted) Springer VEHITS Book*.
- [4] R. Fritzsche and A. Festag, “Reliability Maximization with Location-Based Scheduling for Cellular-V2X Communications in Highway Scenarios,” in *2018 16th International Conference on Intelligent Transportation Systems Telecommunications (ITST)*, Lisboa, Oct. 2018 - Oct. 2018, pp. 1–5.
- [5] Springer, S., Schmidt, C., Schmalfuß, F., “Informationsbedarf von Nutzern konventioneller, vernetzter und automatisierter, vernetzter Fahrzeuge im urbanen Mischverkehr. 1-10.,” in *Forschung im Ingenieurwesen*, pp. 1–10.
- [6] Springer, S., Neumann, I., Kämpfe, B., Morgenstern, T., Krems, J. F., Schmalfuß, F., Busch, J., Vogel, O., Jungmann, A., “HMI-Testing for (Non-) Automated Vehicles in Urban Connected Mixed Traffic: Cooperative Lane Change,” in *11th International ACM Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (AutomotiveUI’19)*.
- [7] J. Lianghai, A. Weinand, B. Han, and H. D. Schotten, “Multi-RATs support to improve V2X communication,” in *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Barcelona, Apr. 2018 - Apr. 2018, pp. 1–6.
- [8] *Human-centred design processes for interactive systems*, 13407, 1999.
- [9] ETSI EN 302 637-2 v1.3.2, “Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service,” 2014.
- [10] ETSI EN 302 637-3 v1.2.2, “Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service,” 2014.
- [11] S. Strobl, M. Klöppel-Gersdorf, T. Otto, J. Grimm, “C-ITS Pilot in Dresden – Designing a modular C-ITS architecture,” in *MT-ITS2019*.
- [12] J. D. van der Laan, A. Heino, and D. de Waard, “A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport telematics,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 5, no. 1, pp. 1–10, 1997.

- [13] J.-Y. Jian, A. M. Bisantz, and C. G. Drury, "Foundations for an Empirically Determined Scale of Trust in Automated Systems," *International Journal of Cognitive Ergonomics*, vol. 4, no. 1, pp. 53–71, 2000.
- [14] P. W. Jordan, B. Thomas, I. L. McClelland, and B. Weerdmeester, *Usability Evaluation in Industry*. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC, 2014.
- [15] J. Nielsen, T. Clemmensen, and C. Yssing, "Getting access to what goes on in people's heads?," in *Proceedings of the second Nordic conference on Human-computer interaction - NordiCHI '02*, Aarhus, Denmark, 2002, p. 101.
- [16] M. Schrepp, A. Hinderks, and J. Thomaschewski, "Design and Evaluation of a Short Version of the User Experience Questionnaire (UEQ-S)," *IJIMAI*, vol. 4, no. 6, p. 103, 2017.
- [17] M. Kloeppel, J. Grimm, S. Strobl, and R. Auerswald, "Performance Evaluation of GLOSA-Algorithms Under Realistic Traffic Conditions Using C2I-Communication," in *Advances in Intelligent Systems and Computing, Data Analytics: Paving the Way to Sustainable Urban Mobility*, E. G. Nathanail and I. D. Karakikes, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 44–52.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN <i>geplant</i>	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel  Abschlussbericht HamonizeDD: Durchgehende Unterstützung vernetzten und automatisierten Fahrens im Mischverkehr mit heterogen ausgestatteten Fahrzeugen	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]  Tim Alscher, Thomas Anders, Rico Auerswald, Claudia Bomholt-Holl, Ansgar Dietermann, Lars Franke, Sven Grunwald, Mario Krumnow, Mathias Haberjahn, Falk Hanisch, Isabel Kreißig, Josef F. Krems, Steffen Kutter, Sven Lorenz, Thomas Otto, Sabine Springer	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.03.2020
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation Online
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI, Zeunerstraße 38, 01069 Dresden  BMW AG, IAV GmbH Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr, MUGLER AG, Noritel Mobile Kommunikation GmbH, Preh Car Connect GmbH, Vodafone GmbH, IVM Institut für Vernetzte Mobilität gGmbH, Technische Universität Chemnitz, Technische Universität Dresden	9. Ber. Nr. Durchführende Institution nicht zutreffend
	10. Förderkennzeichen 16AVF1024
	11. Seitenzahl 42
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) Invalidenstraße 44 10115 Berlin	13. Literaturangaben 17
	14. Tabellen -
	15. Abbildungen 36
16. Zusätzliche Angaben  nicht zutreffend	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)  nicht zutreffend	
18. Kurzfassung  In HarmonizeDD entstanden neuartige Funktionen zur Unterstützung automatisierter sowie konventioneller Fahrzeuge in innerstädtischen Bereichen, die dazu beitragen, wechselseitige Störeinflüsse und Informationsunterschiede zu vermeiden. Diese Funktionen basieren auf einer Mobile Cloud zur flächendeckenden Bereitstellung von Basisdiensten sowie auf lokalen Roadside Units mit erweitertem Funktionsumfang auf bestimmten Strecken. Erweiterte Funktionen für das automatisierte Fahren und neue Assistenzfunktionen für konventionelle Fahrzeuge, welche die Interaktion im Mischverkehr verbessern, wirken dabei nahtlos zusammen. Die entwickelten Ansätze wurden im Digitalen Testfeld Dresden experimentell untersucht, um daraus Schlussfolgerungen für den Ausbau zukünftiger verkehrstechnischer und kommunikationstechnischer urbaner Infrastrukturen abzuleiten.	
19. Schlagwörter Automatisiert, Vernetzt, Kooperativer Mischverkehr, RSU, Mobile Cloud, GeoMessaging, C-ITS Backend, C-ITS Applikationen	
20. Verlag nicht zutreffend	21. Preis nicht zutreffend

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN <i>planned</i>	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title  Final Report HarmonizeDD: Continuous Support of Connected and Automated Driving for Mixed Traffic With Heterogeneously Equipped Vehicles	
4. author(s) (family name, first name(s))  Tim Alscher, Thomas Anders, Rico Auerswald, Claudia Bomholt-Holl, Ansgar Dietermann, Lars Franke, Sven Grunwald, Mario Krumnow, Mathias Haberjahn, Falk Hanisch, Isabel Kreißig, Josef F. Krems, Steffen Kutter, Sven Lorenz, Thomas Otto, Sabine Springer	5. end of project 31.03.2020  6. publication date  7. form of publication Online
8. performing organization(s) (name, address)  Fraunhofer Institute for Transportation and Infrastructure Systems IVI Zeunerstraße 38, 01069 Dresden  BMW AG, IAV GmbH Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr, MUGLER AG, Noritel Mobile Kommunikation GmbH, Preh Car Connect GmbH, Vodafone GmbH, IVM Institut für Vernetzte Mobilität gGmbH, Technische Universität Chemnitz, Technische Universität Dresden	9. originator's report no. n/a  10. reference no. 16AVF1024  11. no. of pages 42
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) Invalidenstraße 44 10115 Berlin	13. no. of references 17  14. no. of tables -  15. no. of figures 36
16. supplementary notes  n/a	
17. presented at (title, place, date)  n/a	
18. abstract  The HarmonizeDD project developed novel functions that assist automated as well as conventional vehicles in urban areas. These functions are based on the complementary approach of current mobile communication technologies and on mobile cloud-solutions that are connected to roadside services.  In order to draw conclusions concerning the expansion of future urban traffic and communication infrastructure, the generated approaches was be experimentally investigated and demonstrated in the digital test field of Dresden.	
19. keywords automated, connected, cooperative transport, RSU, Mobile Cloud, GeoMessaging, C-ITS Backend, C-ITS Applications	
20. publisher n/a	21. price n/a