



# EUROPEAN DIGITAL DYNAMIC MAPPING (EDDY)

BMDV mFUND – Förderkennzeichen 01F2208

## Schlussbericht

**confidential** vertraulich     **restricted** beschränkt     **public** öffentlich

29. April 2025



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Erläuterung

Dieser Bericht wurde erstellt, um die formalen Anforderungen an den Schlussbericht nach I und II des „Muster Sachbericht/Schlussbericht“ zu erfüllen. Ein ausführlicher Bericht, der die Projektergebnisse einer inhaltlichen Logik folgend wiedergibt, findet sich im Anhang dieses Dokuments.

## Inhaltsverzeichnis

<b>I. Kurze Darstellung</b>	<b>3</b>
1. Aufgabenstellung . . . . .	3
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde . . . . .	3
3. Planung und Ablauf des Vorhabens . . . . .	3
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde . . . . .	3
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen . . . . .	4
<b>II. Eingehende Darstellung</b>	<b>5</b>
1. Verwendung der Zuwendung und erzielt es Ergebnis im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele . . . . .	5
2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises . . . . .	5
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit . . . . .	5
4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans . . . . .	5
5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stelle . . . . .	12
6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses . . . . .	13
<b>A. Übersicht verwendeter Literatur und Standards</b>	<b>16</b>

# **I. Kurze Darstellung**

## **1. Aufgabenstellung**

Automatisierte und autonome Fahrzeuge benötigen für die Funktion ihrer Systeme umfangreiche, detaillierte, präzise und aktuelle Daten zum Straßenraum in dem sie sich bewegen. Aus diesem Grund sind sie meist mit umfangreicher Bordsensorik ausgestattet, beispielsweise mit Kameras und LiDAR. Die so gewonnenen Informationen werden im Fahrzeug in der Local Dynamic Map (LDM) zusammengeführt, einer Karte, die die unterschiedlichen Fahrsysteme mit den jeweils benötigten Daten versorgt. Die mit der fahrzeugeigenen Sensorik erfassten Daten sind allerdings selten vollständig. Die Idee im Projekt EDDY war es daher, ein System zu schaffen, das in der Lage ist, diese Informationslücke zu schließen und vernetzte Fahrzeuge fortlaufend und in Echtzeit mit den benötigten Daten zu versorgen. Der gewählte Ansatz baut auf dem Konzept der LDM auf und erweitert es um Crowd-Sourcing- und Data-Sharing-Komponenten. Statt die Daten nur lokal im Fahrzeug zu speichern, sollen sie über eine geteilte, gemeinsame Karte anderen Verkehrsteilnehmenden zugänglich gemacht werden. Gleichzeitig können Daten der so entstandenen mobilen Sensorflotte anderen Zwecken bspw. im Bereich des Verkehrsmanagement, der Verkehrssteuerung zugeführt werden.

## **2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Fehlende Standards und Normen sowie die Dominanz durch große Fahrzeughersteller sowie Navigationsdatenanbieter führen dazu, dass die Einflussnahme kommunaler Aufgabenträger auf das Verkehrssystem nur bedingt gewährleistet ist. Hierbei sind aktuelle Daten und zuverlässige Schnittstellen Voraussetzung für das automatisierte und vernetzte Fahren (AVF). Für die öffentliche Hand, die dem gesamtgesellschaftlichen Interesse und Gemeinwohl verpflichtet ist, ist es die Aufgabe, die Datenbereitstellung als kommunale Daseinsvorsorge zu begreifen. Sie soll somit in die Hoheit ihrer eigenen, auf Plattformen gesammelten Daten, gesetzt werden.

## **3. Planung und Ablauf des Vorhabens**

Abbildung 1 zeigt den Zeit- und Arbeitsplan in finaler Form. Das Projekt startete im November 2021 mit einer Laufzeit von drei Jahren. Dazu kam eine kostenneutrale Projektverlängerung um drei Monate zu einer Gesamtlaufzeit von 39 Monaten mit Projektende im Januar 2025.

## **4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

### **4.1. Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden**

Die Arbeiten im Projekt EDDY bauen auf auf einer Vielzahl von Methoden, Standards, Algorithmen und Softwarekomponenten aus dem Kontext Digitaler Zwillinge, dem Connected Vehicle und der Local Dynamic Map auf. Alle im Projekt eingesetzten Elemente zur Lösung einer spezifischen Problemstellung sind Bestandteil der Standardisierung oder frei verfügbar und nicht durch Schutzrechte Dritter eingeschränkt. Beispiele für genutzte Kommunikationsstandards sind

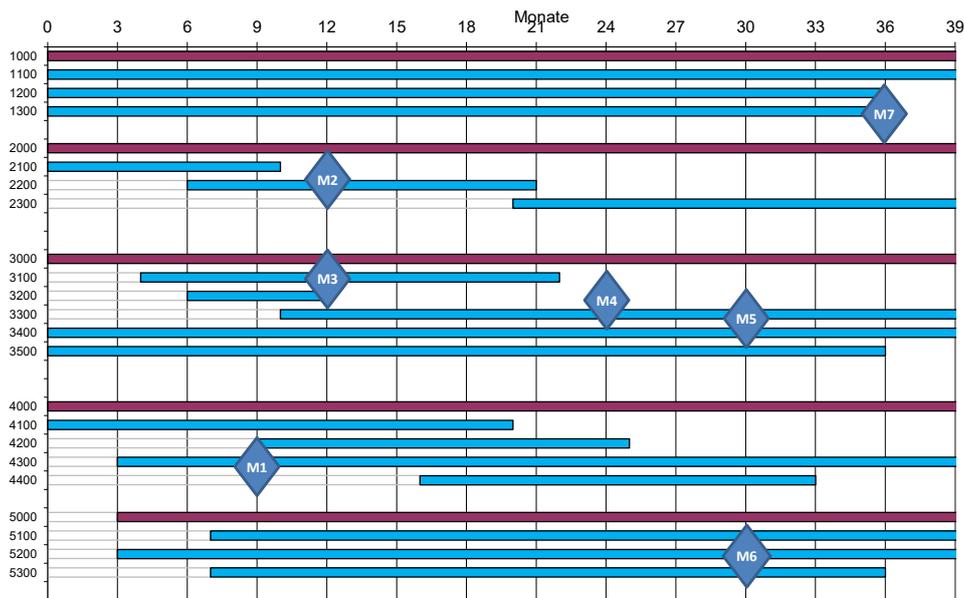


Abbildung 1: Zeitlicher Ablauf des Projekts EDDY.

in Tabelle 8 dargestellt. Ein weiteres Beispiel ist der Standard OGC API - FEATURES [1]. Ein Beispiel für eine eingesetzte, frei nutzbare Software ist der Geoserver [2].

#### 4.2. Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Die technischen Inhalte und Use-Cases des Projektes EDDY bewegen sich im Spannungsfeld zwischen Entwicklungen zum Digitalen Zwilling im Kontext von Smart City und Mobility, dem vernetzten Fahrzeug im Internet of Vehicles sowie der Local Dynamic Map, die den Ausgangspunkt für die Inhalte des Projektes bildete. Im Zuge des Projektes wurde eine große Zahl an Veröffentlichungen gesichtet, im Hinblick auf die Projektinhalte bewertet und nach Bedarf berücksichtigt. In Vorbereitung einer geplanten, abschließenden Publikation zum Projekt wurden diese tabellarisch zusammengefasst und sind im Anhang in den Tabellen 4 bis 8 abgebildet.

#### 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Projekt wurde sich mit vielen Organisationen und Vorhaben ausgetauscht, aufgrund des weitgefassten Betätigungsfeldes von EDDY wurde ein breites Spektrum an Themengebieten adressiert: von der Datenerfassung mit verteilten Sensorsystemen (u.a. mFund Projekte Infra-sense und Deus\_SmartAir, Mobileye sowie Automobilzulieferer ZF), über die Bereitstellung auf Datenplattformen (u.a. Mercedes Benz, Bridgestone, Mobility Data Space und Here) zur Datennutzung im Fahrzeug (u.a. Volkswagen, Everycorner und Bosch E-Bike Systems). Des Weiteren wurde sich im Rahmen eines vom Projekt organisierten Workshops sowie der C-Roads Platform mit anderen Städten ausgetauscht. Zu einer konkreten Zusammenarbeit kam es mit der Continental AG, deren System für Kollisionswarnungen in den Use Case zum Schutz vulnerabler Verkehrsteilnehmender eingebunden wurde.

## **II. Eingehende Darstellung**

### **1. Verwendung der Zuwendung und erzieltes Ergebnis im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele**

Die mit der Zuwendung finanzierten Arbeiten sind im angehängtem Sachbericht detailliert beschrieben, ebenso die erzielten Ergebnisse. Die dort enthaltene Zusammenfassung stellt die Ergebnisse den Zielen gegenüber.

### **2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Die Positionen und Nachweise werden von den jeweiligen Projektpartnern gesondert eingereicht.

### **3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die abgerufenen finanziellen Mittel wurden ausschließlich für das Projekt EDDY verwendet. Die geleisteten Arbeiten werden im angehängten Sachbericht beschrieben und dort inhaltlich und der Zielsetzung entsprechend motiviert. Die Notwendigkeit und Angemessenheit ist damit impliziert.

### **4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

In diesem Kapitel wird der Nutzen und die Verwertung der Projektergebnisse dargestellt. Zunächst wird der Nutzen für die Freie und Hansestadt Hamburg beleuchtet, die Liste orientiert sich dabei eng an den Auflagen des Zuwendungsbescheids. Insofern Projektergebnisse erwähnt sind, sind sie unter dem Zutun aller Projektpartner entstanden. In den anschließenden Abschnitten wird darüber hinaus der zusätzliche individuelle Nutzen für die einzelnen Projektpartner herausgestellt.

#### **4.1. Nutzen in der Stadt Hamburg**

- In EDDY wurde sich im Projektverlauf bewusst entschieden, keine App zu entwickeln die Endnutzern einen direkten, vollständigen Zugriff auf die UDM ermöglicht. In dem Sinne gibt es keine EDDY-App. Die Architektur der UDM wurde so angelegt, dass über standardisierte Schnittstellen Daten anwendungsspezifisch abgerufen und in Drittanwendungen für konkrete Aufgaben aufbereitet werden können. Im Projekt wurden exemplarisch mehrere solcher Drittanwendungen entwickelt (Das Web-Frontend zur *bedarfsgerechten Datenerfassung*, die Web-Applikation zum Versenden von Cooperative Awareness Messages und das Projektdashboard). Die Integration dieser und weitere Funktionalitäten in umfassendere Applikationen ist durchaus denkbar und empfehlenswert. Vor dem Hintergrund, dass die App Strategie der Stadt Hamburg sich während des Projektes im Umbruch befand, wurden in diese Richtung keine konkreten Schritte eingeleitet.

- Die Möglichkeit zur Integration der UDM Daten in Infotainment-Systeme ist gegeben. Durch die Verwendung der standardisierten OGC API Features Schnittstelle können Vektordaten zu Verkehrsobjekten auf einfache und effiziente Weise abgerufen werden. Entsprechende Prozesse von der Erkennung zur Bereitstellung wurden auf der UDM am Beispiel von Verkehrsschildern und Baustellenbaken demonstriert. Die Prozesse können auf weitere Objektklassen erweitert werden.
- Die im Projekt erstellte HD Karte der Teststrecke für Automatisiertes und Vernetztes Fahren (TAVF) kann auf der [Urban Data Platform](#) abgerufen werden. Es ist zu beachten, dass wir unter HD-Karte das hochaufgelöste, fahrstreifengenaue Straßennetzwerk in Form von Vektordaten verstehen. Die damit über die Geoposition verknüpften anderen Datensätze der Urban Dynamic Map können über geeignete weitestgehend standardisierte Schnittstellen abgerufen werden. Das umfasst *Sensor Daten* über die SensorThings API, *Vektordaten* über die OGC API Features Schnittstelle, *V2X-Nachrichten* über einen AMQP-Broker, *Raster Daten* über OGC WFS, WMS und WCS Schnittstellen sowie *LiDAR-Punktwolken* über eine projektspezifische Schnittstelle. Der Betrieb der Datenserver wird nach Projektende in der Form zunächst nicht fortgeführt. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse werden aber in die Weiterentwicklung zu betriebsbereiten Diensten einfließen. Beispieldatensätze werden auch nach Projektende zum Download verfügbar sein und können über den [Metadatenkatalogeintrag](#) gefunden werden.
- Die Metadaten der auf der Urban Data Platform angebotenen Datensätze sind automatisch auf der Mobiltheke zu finden.
- In der Freien und Hansestadt Hamburg (FHH) wird sich in Arbeitsgruppen mit dem Aufbau eines digitalen Zwillings beschäftigt. Bislang beschränken sich die Bemühungen auf ein Gebäudemodell (BIM). Es ist denkbar insbesondere die von Fahrzeugen erfassten LiDAR-Punktwolken einem entsprechenden Modell zuzuführen. Aufgrund der beschränkten Perspektive von der Fahrbahn aus, kann so nur ein Teil der Gebäudeaußenflächen erfasst werden, dafür bietet sich aber der Vorteil einer kontinuierlichen Aktualisierung. Zur Etablierung von geeigneten Prozessen sind noch weitere Forschungsarbeiten notwendig.
- Das Projekt EDDY wird in der [Strategie Digitale Mobilität](#) im Bereich der *kooperativen Systeme* aufgeführt. Dort stellt es einen wichtigen Entwicklungsschritt dar, insbesondere auch auf dem Weg zur hybriden ITS Kommunikation. Darüber hinaus hat das Projekt Anknüpfungspunkte zu vielen weiteren Entwicklungspfaden der Strategie, hervorzuheben sind hier die Pfade *Mobilitätswillige*, *Verkehrsmanagement* und *Erhaltungsmanagement*. Die Integration der Projektergebnisse in zugehörige Prozesse und Systeme wird fortlaufend geprüft, insbesondere in das sich im Aufbau befindende *Mobility Operating System* in dem viele der erwähnten Pfade zusammengeführt werden.
- Die FHH ist Partner in C-Roads und dort in mehreren Working Groups (WG) und Task Forces (TF) involviert. Mitglieder des EDDY Projektteams haben ihre Erkenntnisse unter

anderem in der Working Group 4 (Urban C-ITS Harmonisation) vorgestellt, sich am regelmäßigen Austausch der Working Group 5 (Digital Transport Infrastructure) beteiligt und sich in der Task Force 4 (Hybrid Communication) eingebracht [Anm.: die Nummerierung der Arbeitsgruppen wurde Anfang 2025 geändert].

- Zum Projektende wurde evaluiert, inwiefern die entwickelte Software in Form einer Open-Source-Veröffentlichung der Allgemeinheit zur Verfügung gestellt werden kann. Das Projektkonsortium hat sich aufgrund mehrerer Aspekte dagegen entschieden. So wurde nicht *ein* zusammenhängendes „Stück Software“ im Sinne eines integrierten Gesamtsystems entwickelt, welches als Software-Plattform offenlegbar ist. Die UDM in EDDY ist ein komplexes System aus heterogenen Einzelkomponenten, die auch unabhängig voneinander bestehen können. So wurden als Basis bereits etablierte Open-Source-Komponenten „as is“ verwendet, wie bspw. RabbitMQ, GeoServer oder Apache Flink. Fehlende Komponenten und notwendige Datenkonvertierungswerkzeuge zur Verknüpfung der Dienste, wurden von den Projektpartnern entwickelt. Ein Beispiel hierfür sind die unterschiedlichen und temporären V2X-Message-Konverter, die im Falle einer vollständig standardkonformen Kommunikationskette obsolet gewesen wären. All diese Einzelkomponenten haben unterschiedliche Entwicklungsgrade, basieren auf unterschiedlichen Konzepten, sind in unterschiedlichen Programmiersprachen implementiert und bedienen häufig nur Spezialfälle der Datenverarbeitung in EDDY. Ihre Entwicklung und Weiterführung liegt in der Verantwortung der jeweiligen Partner. Theoretisch könnten diese Eigenentwicklungen individuell als Open-Source-Software veröffentlicht werden. Die benötigten Ressourcen zur Aufbereitung, Dokumentation und Wartung dafür standen zum erwarteten Mehrwert angesichts der oben genannten Gründe in einem ungünstigem Verhältnis.
- Die Projektergebnisse werden in allgemein verständlicher Form auf dem [Projektdashboard](#) präsentiert.
- Im Zuge des Projektes EDDY wurde der bildbasierte Algorithmus zur Lokalisierung anhand von Landmarken erweitert, um bei bekannter und gültiger Fahrzeugposition Baustellenbaken relativ zum Fahrzeug in den Kameradaten erkennen und lokalisieren zu können. Durch die Zusammenführung mit der Fahrzeugposition kann hieraus die absolute geografische Position einer Baustellenbake ermittelt und in die UDM übertragen werden. Dieses Objekterkennungs- und Übertragungssystem wurde prototypisch auf dem Testfahrzeug der HAW Hamburg implementiert und in einer live-Demonstration am 16.11.2023 beim Projektpartner LSBG in Hamburg erfolgreich vorgeführt. Die so gewonnenen Daten wären geeignet gewesen, um das System Geonetbake zu verbessern, was darauf basierte Baustellenbaken mit GNSS-Sensoren auszustatten, sich aber mit systematischen Fehlern der GNSS-Positionierung im urbanen Raum konfrontiert sah. Aufgrund dieser Problematik wurde das Geonetbake System während der EDDY Projektlaufzeit eingestellt. Ob ein fahrzeuggestützter Ansatz zur Bakenlokalisierung geeignet ist, das Geonetbake System vollständig zu ersetzen, muss neu evaluiert werden.

## **4.2. consider it**

Das in EDDY entwickelte mobile Messsystem lieferte Erkenntnisse im Bezug auf die Notwendigkeit der Vergleichbarkeit von Daten verschiedener Messsysteme. Ist diese gewährleistet, bietet ein modulares und flexibel montierbares System viele Vorteile, insbesondere in Bezug auf Flexibilität, Mobilität und Kosteneffizienz. Durch die kompakte Bauweise und Wendigkeit von den in EDDY genutzten Scootern lassen sich Daten auch in schwer zugänglichen oder eng bebauten städtischen Gebieten erfassen – dort, wo größere Fahrzeuge scheitern oder schlicht zu aufwendig wären. Die vergleichsweise geringen Betriebskosten ermöglichen eine höhere Messfrequenz sowie den Einsatz mehrerer Einheiten parallel, was zu einer dichteren Datenbasis führt.

Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, das System modular aufzubauen: Je nach Bedarf können unterschiedliche Sensoren integriert werden – etwa zur Erfassung von Luftqualität, Lärmpegeln, Vibrationen, Fahrbahnbeschaffenheit oder Verkehrsfluss. Diese Daten sind für viele Akteure hochinteressant: Städte und Kommunen können damit fundierte Entscheidungen zur Verkehrsführung oder Umweltpolitik treffen. Ingenieurbüros und Bauunternehmen nutzen sie zur Zustandserfassung von Infrastruktur, während Forschungsinstitute die Daten für stadtplanerische und umwelttechnische Studien auswerten. Auch Betreiber von Mikromobilitätsflotten könnten von Echtzeitdaten zur Streckenqualität profitieren, um ihre Scooter effizienter zu warten und den Fahrkomfort zu erhöhen.

Das Anbieten eines mobilen, kostengünstigen Messsystems bietet dem zu Folge Potential durch seine Skalierbarkeit. In EDDY wurde dafür die Grundlage geschaffen. Um das Messsystem als Produkt anbieten zu können, muss aber eine Vergleichbarkeit zwischen der Montage auf verschiedenen Fahrzeugen (Scooter, Fahrräder, Busse, etc.) weiter untersucht werden.

Die im Projekt entwickelten Grundlagen und erworbenen Kenntnisse werden in aktuelle Produktentwicklungen einfließen und so das Portfolio der consider it GmbH in den oben genannten Bereichen erweitern.

## **4.3. HAW Hamburg**

Im Rahmen des Projektes EDDY konnte die HAW Hamburg ein Server- und Sensor-basiertes System zur robusten Lokalisierung anhand optischer Marker konzipieren, umsetzen und testen. Durch den Start einer Promotion in 2025 mit dem Ziel der Umsetzung einer hochpräzisen, hochverfügbaren und robusten Lokalisierung (beyond visual), wird dieses System bis 2028 erweitert, verbessert und international verfügbar gemacht. Das Projekt hat bereits zum Abschluss die Sichtbarkeit der Forschungsaktivitäten der HAW Hamburg zur Lokalisierung in Europa (ESA) und den USA (ION) spürbar erhöht. Aufgrund aktueller globaler Entwicklungen kann dieses System zukünftig ein wichtiger Baustein werden, um Städte und systemrelevante Dienste, wie die Feuerwehr oder den Krankentransport, robust und resilient gegen Sabotage oder hybride Angriffe zu machen.

Die Projektergebnisse fließen zudem in das Projekt „UrbanRFMap“, gefördert durch die IFB Hamburg ein, in welchem ein robustes, low-cost Umfeldsensorysystem mit Serverkopplung prototypisch implementiert wird. Der Industriepartner beabsichtigt nach Abschluss dieses Projektes die weitere Kommerzialisierung. Ein Folgeantrag ist in Vorbereitung, bei der der HAW Hamburg die

starke Verzahnung in die kleine und mittelständische Industrie sowie in die FHH zugute kommt.

Im Rahmen des Projektes EDDY wurden Projektfragestellungen und Projektergebnisse in hohem Maße in der Lehre auf vorwissenschaftlichem und wissenschaftlichem Niveau mit Studierenden der Ingenieurwissenschaften im Unterricht diskutiert und genutzt. Seit dem Projektstart wurden Inhalte aus dem Projekt EDDY in insgesamt 13 Lehrveranstaltungen (jeweils 1 Semester) genutzt, entweder zur Veranschaulichung von Einzelthemen, durch Nutzung von Messdaten für die Datenanalyse oder auch als komplexe Projektaufgaben in höheren Semestern. Die Studierenden schätzten besonders die persönliche Teilnahme von Projektpartnern bei der Klärung der Aufgabenstellung und in den Abschlussveranstaltungen. Es wurden insgesamt 12 Studien- und Projektaufgaben (typ. 3-6 Monate) in Einzel- oder Gruppenprojekten umgesetzt. Es sind 5 wissenschaftliche Abschlussarbeiten auf Bachelor- oder Master-Niveau (3-6 Monate) entstanden. Weiterhin konnte eine kooperative Promotion in Zusammenarbeit der HAW Hamburg mit der Universität Politècnica de València (UPV) gestartet werden. Das Promotionsthema und der Promovierende wurden seitens der Partneruniversität bestätigt und die Ergebnisse aus dem Projekt EDDY werden als Vorarbeiten auf europäischer Ebene genutzt. Eine Anbahnung einer gemeinsamen europäischen Förderung ist in Vorbereitung. Eine Detailübersicht der Nutzung im Kontext der Ingenieurausbildung erfolgt im Einzelbericht der Hochschule.

#### **4.4. IKEM**

Die Projektergebnisse zu Rechtsfragen der Datenökonomie werden für das IKEM die Grundlage weiterer Forschung bilden, insbesondere in Bezug auf automatisiertes, autonomes und vernetztes Fahren und zur Digitalisierung im öffentlichen Verkehr und im öffentlichen Verkehrsraum. Die erlangten Erkenntnisse haben insbesondere einen vertieften Einblick gegeben, was Urban Dynamic Maps unter dem derzeitigen Rechtsrahmen (z. B. ohne Produktsicherheitsrecht oder andere verbindliche Rechtliche Qualitätsgarantien für Daten) nicht zu leisten vermögen. Das IKEM hat daher einen wichtigen Impuls für die Weiterentwicklung der Datenverwendung geben und weiteren F&E-Bedarf deutlich gemacht. Das Rechtsgutachten wurde auf der [Website](#) des IKEM veröffentlicht und ist somit dem allgemeinen Fachpublikum frei zugänglich. Zudem ist geplant, die Ergebnisse in weiteren Publikationen zu berücksichtigen und diese somit noch umfassender der (Fach)Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen. Darüber hinaus werden die Ergebnisse weiterhin etwa durch Präsentationen auf wissenschaftlichen Konferenzen in den wissenschaftlichen und öffentlichen Diskurs eingebracht werden und zudem durch Verwendung in wissenschaftlichen Lehrveranstaltungen der IKEM-Zugehörigen Lehrtätigen zur Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses nachhaltig eingebracht. Konkret knüpft das IKEM an die Ergebnisse aus EDDY in den Forschungsprojekten ABSOLUT II und Ahoi an und in verschiedenen in der Antragsphase befindlichen Forschungsprojekten, in denen die Weiterentwicklung des Datenraums in dem sich autonome Fahrzeuge bewegen weiterhin rechtlich begleitet wird.

#### **4.5. DLR**

Das DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik integriert die im Rahmen des Projekts implementierten Komponenten in die eigenen Forschungsanlagen, vornehmlich in Form von Software für

die Fahrversuchsträger bzw. die Backends zur Bereitstellung von Datendiensten. In diesem Zusammenhang werden die demonstrierten UDM-Dienste in die eigenen Systeme portiert, hierzu betreibt das DLR eine eigene GeoServer-Instanz<sup>1</sup> sowie die darauf zugreifenden Systeme der vernetzten und automatisierten Fahrversuchsträger<sup>2</sup>. Eine unmittelbare Verwertung der Ergebnisse ist für Themen aus folgenden Forschungsprojekten gegeben:

- Gaia-X 4 AMS (BMWK, FKz. 19S21004B) und Gaia-X 4 AGEDA (BMWK, Fkz. 19S220-04N) – Das Gaia-X-Ökosystem soll eine Grundlage für verschiedene Datendienste, inklusive Echtzeit-Mobilitätsdienste werden, die im Rahmen der Gaia-X 4 Future Mobility Projektfamilie entwickelt werden. Mögliche Anwendungen einer UDM sind dynamische und spontane Änderungen des Verkehrsraums (in den genannten Projekten u.a. bei Rettungsgassen und bei unmittelbar auftauchenden Hindernissen), dessen Erkennung und dessen Kommunikation an vernetzte bzw. automatisierte Verkehrsteilnehmer. Die Standardisierung von dynamischen geobezogenen Informationen und entsprechenden Bereitstellungsdiensten ist für flächendeckende Anwendungen wie z.B. die Entwicklung entsprechender Assistenz- und Automationsfunktionen wesentlich.
- OKULAr (BMWK, FKz. 19A22003B) – Das Projekt forscht an alternativen Positionierungsverfahren für die Navigation bei Ausfall von Satellitennavigation. Der in EDDY entwickelte Dienst zur Bereitstellung von LiDAR-Punktwolkenkarten kann für die hier entwickelte LiDAR-Lokalisierungslösung verwendet werden. Der Projektpartner und Fahrzeugzulieferer Valeo sieht grundsätzlich einen Mehrwert von serverseitigen Kartendaten für LiDAR-Navigationszwecke. Ferner plant das DLR Folgeaktivitäten, um die Erkenntnisse aus den Projekten EDDY und OKULAr zusammenzubringen.
- IMoGer (BMDV, FKz. 45AVF7A011) – In der Stadt Braunschweig wird bis 2027 ein kombinierter Shuttle- und Logistikdienst prototypisch demonstriert. Bei der Automation der Fahrzeugflotte werden einerseits aktuelle Kartendaten, andererseits V2X-Infrastruktur an einer komplexen Kreuzung benötigt. Aktuell wird erarbeitet, inwiefern statische und dynamische Karteninformationen für die Umsetzung benötigt werden bzw. Vorteile bei der konkreten Umsetzung bringen.
- ErlebensAtlas (BMDV, FKz. 19F1197A) – Bei der Verarbeitung, Bereitstellung und Visualisierung von raum-zeitlichen Erlebensdaten von Reisenden wird dieselbe Methodik der hexagonalen Aggregation verwendet, wie bei der Aggregation von V2X- und Sensordaten in EDDY.

Mit den oben genannten Projekten erfolgt ein direkter Austausch mit weiteren Industriepartnern zu möglichen Einsatzgebieten einer UDM sowie zu entsprechenden Folgeaktivitäten. Neben den genannten Projekten ist zwischen dem DLR und der FHH eine langfristige Kooperation vereinbart worden, unter der zukünftige Aktivitäten koordiniert werden. Dies bedeutet neben den

---

<sup>1</sup>GeoServer, <https://ts.dlr.de/mumme-server/>

<sup>2</sup>Automatisierte Fahrzeuge, <https://www.dlr.de/de/ts/forschung-und-transfer/forschungsinfrastruktur>

Institutsstandorten Berlin und Braunschweig eine vorrangige Ausrichtung von Forschungsaktivitäten in Hamburg.

Voraussichtlich in Q3/2025 wird eine Masterarbeit fertiggestellt, die sich mit der automatisierten Extraktion von HD-Kartenelementen aus LiDAR-Punktwolken mithilfe von Machine-Learning beschäftigt. Als Trainingsbasis für die Machine-Learning-Modelle dienen wiederum HD-Kartendaten im Format OpenDRIVE, wie sie auch in Hamburg im Bereich der TAVF vorliegen.

#### **4.6. Oecon**

Die OECON Products & Services GmbH konnte im Projekt EDDY die bestehenden Kenntnisse im Aufbau eines Backends mit unterschiedlichsten Anforderungen an die Datenverfügbarkeit bei Nutzung verschiedenster Services und Schnittstellen umfangreich erweitern.

Im Projektverlauf wurde bewusst entschieden, keine abgeschlossene Plattform zu schaffen, sondern individuelle Lösungen für einzelne Dienste zu verwirklichen. So konnte die serverseitige Umsetzung der Kommunikationsarchitektur und Datenverarbeitung so umgesetzt werden, dass Stakeholder und Komponenten einzeln an das System angeschlossen werden, um damit Use-Case-spezifische Daten kontinuierlich bereitzustellen. Die dabei gewonnenen Erkenntnismehrwerte werden auch in aktuell laufenden Projekten wie Gaia-X 4 AMS (BMW Fkz. 19S21004T) oder AutoFlow (BMW Fkz. 03EE3064E) genutzt sowie in zukünftige Projekte im F&E-Umfeld und eigene Produkte der OECON einfließen.

#### **4.7. Ubilabs**

Im Rahmen des EDDY-Projekts konnte Ubilabs sein Portfolio im Bereich urbaner Datenvisualisierung und -analyse maßgeblich erweitern und daraus bereits während der Projektlaufzeit konkrete wirtschaftliche Mehrwerte generieren. Die im Projekt entwickelten Technologien und Konzepte wurden erfolgreich in das bestehende Geschäftsmodell integriert und bilden die Grundlage für zukünftige Produktentwicklungen sowie neue Dienstleistungsangebote.

**Erschließung neuer Geschäftsfelder und Kundengruppen** Durch die intensive Zusammenarbeit mit diversen urbanen Stakeholdern während des Projekts konnten wertvolle Kontakte zu kommunalen Entscheidungsträgern aufgebaut werden. Diese Netzwerkbildung führte zur Erschließung neuer Geschäftsfelder im öffentlichen Sektor. Besonders hervorzuheben ist hier die Entwicklung eines Standortplanungstools für die Feuerwehr Düsseldorf, das direkt auf den in EDDY gewonnenen Erkenntnissen aufbaut. Die Umsetzung dieses Projekts dient als Referenz für ähnliche Vorhaben im Bereich des Katastrophenschutzes und der öffentlichen Sicherheit.

**Technologische Weiterentwicklung mit Marktrelevanz** Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im EDDY-Projekt ermöglichten Ubilabs die zielführende Weiterentwicklung von Visualisierungstechniken für urbane Daten. Insbesondere die Implementierung verschiedener Frameworks wie kepler.gl und die Google Maps API in einem vereinheitlichten Frontend sowie die Evaluation unterschiedlicher Darstellungsformen für verschiedene Datenkategorien führten

zu einem erheblichen Wissens- und Kompetenzgewinn. Die Erarbeitung neuer Lösungsansätze zur Integration heterogener Datenquellen (wie etwa MQTT-Datenquellen in 3D-Kartenprojekte) stellt einen wichtigen Wettbewerbsvorteil dar.

**Vermarktung des erweiterten Leistungsportfolios** Das im Projektverlauf erstellte **interaktive Portfolio-Showcase** hat sich als äußerst wertvolles Instrument in der Kundenakquise und Projektanbahnung erwiesen. Es dient als anschauliche Demonstration der technischen Möglichkeiten und wird regelmäßig in Kundengesprächen eingesetzt. Die dort präsentierten Visualisierungstechniken und Anwendungsfälle generieren konkrete Projektanfragen und unterstützen die Vermarktung der entwickelten Technologien.

**Transfer in zukünftige Projekte** Die im EDDY-Projekt gewonnenen Kompetenzen fließen derzeit aktiv in eine laufende Ausschreibung zum Thema Urbane Resilienz im Rahmen des Global Technology Innovation Fund (GTIF) der Europäischen Weltraumorganisation ein. Dies unterstreicht die Nachhaltigkeit der Projektinvestitionen und die langfristige Verwertungsstrategie der gewonnenen Erkenntnisse.

**Ausblick** Zukünftig plant Ubilabs, das erlangte Know-how weiter auszubauen und in modulare, marktreife Produkte zu überführen. Insbesondere die Kombination aus dynamischen Kartendaten und Echtzeit-Visualisierungen bietet erhebliches Potenzial für Smart-City-Anwendungen, Verkehrsmanagement und Krisenreaktionssysteme. Die im EDDY-Projekt gewonnenen Erkenntnisse bilden eine solide Grundlage für die Positionierung von Ubilabs in diesem Bereich.

## **5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stelle**

Viele Fahrzeughersteller (z. B. Mercedes Benz), Zulieferer (z. B. Bridgestone, ZF) und Dienstleister (z. B. Here) aus der Mobilitätsbranche und darüber hinaus (z. B. Vodafone) arbeiten zur Zeit an dem Aufbau von Mobilitätsdatenplattformen, über die sie aufbereitete Daten von eigenen oder kooperierenden Fahrzeugen vermarkten möchten.

Dem Eindruck aus diversen Gesprächen im Projektverlauf nach, sind diese Angebote aktuell noch nicht ganz ausgereift und viele Fragen, zum Beispiel zur standardisierten Erfassung und Bereitstellung der Daten auch dort noch ungeklärt. Aufgrund der Vielzahl an Angeboten ist außerdem davon auszugehen, dass der Markt sich in den nächsten Jahren konsolidieren wird.

Die Plattformen decken meist auch nur einen Teil der Use Cases ab, die mit der UDM verfolgt wurden. Die Aufbereitung von Fahrzeugbewegungsdaten und die Erfassung des Straßenzustands sind allerdings prominent vertreten.

Es gilt auch zu bedenken, dass aufgrund des Fokus auf die eigenen Fahrzeugflotten, diesen Plattformen keine Stichprobe des Gesamtverkehrs zu Grunde liegt und mit Biases in den Daten zu rechnen ist, die mitunter zu verzerrten Abbildungen oder Fehlinterpretationen führen können. Es ist außerdem zu berücksichtigen, dass unter Umständen Interessenskonflikte zwischen dem Plattformanbieter mit seinen Flottenfahrzeugen und der Allgemeinheit vorliegen.

Auch auf Seiten von Förderprojekten gab es Fortschritte in den von EDDY bearbeiteten Themengebieten. Bei der sensorgestützten Datenerfassung mit Crowd-Sourcing Ansätzen gibt es viele Überschneidungen zu den mFund Projekten *INFRA**Sense* und *DEUS\_SmartAir*. Mit beiden Projekten wurde sich ausgetauscht. Es empfiehlt sich gemeinsam an einer Vereinheitlichung der Datenbeschreibung zu arbeiten, um Daten über Systemgrenzen hinweg teilen zu können und eine überregionale Vergleichbarkeit der Messungen zu ermöglichen.

Das mFund Projekt *ValStreet* beschäftigt sich mit der kontinuierlichen Validierung von HD-Kartendaten. Ein ähnlicher Ansatz wurde auch im Projekt *KIS'M* untersucht. Hier wurde eine Smartphone Applikation zur Erkennung von Verkehrsobjekten entwickelt. Aus beiden Projekten sind Impulse zu erwarten, die den aktuell noch großen manuellen Aufwand in der Erstellung der HD-Karten reduzieren.

In der Domäne der V2X-Nachrichten wird die internetbasierte Kommunikation im Rahmen von C-Roads (Task Force 4) weiter spezifiziert. Die Spezifikation bezieht sich auf die Kommunikation zwischen die C-ITS Managementzentrale und Service Provider und deckt damit nur teilweise den Anwendungsbereich von EDDY ab. Dennoch sind die dort erarbeiteten Vorgaben zu verfolgen und in der Weiterentwicklung der UDM zu berücksichtigen.

Durch die Präsentation der Ergebnisse auf der ION Technical Conference [3] sowie die Teilnahme an einer Podiumsdiskussion zum Thema Mobility auf den ESA NAVISP Industry Days 2023 [4], konnten die Projektpartner einen aktualisierten, internationalen Überblick über die Problemstellungen und den Stand der Technik im Bereich Positioning, Navigation, and Timing (PNT) erhalten. Hierbei bestätigte sich, dass eine rein GNSS-basierte Lokalisierung in komplexen, urbanen Umgebungen nicht ausreichend verfügbar, robust und störsicher ist, um sicherheitsrelevante Systeme, wie z.B. hoch-automatisierte Fahrzeuge, zu ermöglichen. Darüber hinaus, bietet dieses System viele Angriffspunkte und bildet häufig einen „single point-of-failure“, der zum Ausfall sicherheitskritischer Dienste führen kann.

## 6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Die Projektergebnisse aus dem Projekt EDDY wurden im Rahmen der wissenschaftlichen Verwertung publiziert (s. Tabelle 1). Darüber hinaus wurden Ergebnisse in weiteren Formaten veröffentlicht (s. Tabelle 2). Daten aus dem Projekt wurden öffentlich zugänglich gemacht und sind in Tabelle 3 aufgelistet. Weitere Veröffentlichungen befinden sich in Vorbereitung, sie werden sich künftig unter anderem über den Metadatenkatalogeintrag zum Projekt finden lassen.

Tabelle 1: Wissenschaftliche Publikationen mit Peer-Review zum Projekt EDDY

Referenz	Titel	Autoren	Veröffentlichte Projektinhalte aus dem Projekt EDDY
[3]	Localization of Autonomous Vehicles in Complex, Urban Environments and the Implementation Based on a Multi-Kalman Approach in Combination with a Local Dynamic Map	Maximilian Weltz, Rasmus Rettig	Visual Localization

Referenz	Titel	Autoren	veröffentlichte Projektinhalte
[5]	Virtuous, multi-level integration of research and education within the project European Digital Dynamic Mapping (EDDY)	Rasmus Rettig, Maximilian Weltz	Anonymization, Street Quality, Localization
[6]	SLAM as a Service for Self-Driving Cars	Franz Andert et al.	UDM-basierter, skalierbarer Kartendienst zur LiDAR-gestützten Fahrzeugnavigation
[7]	Spatio-Temporal Alignment between Cooperative Sensor Platforms	Jörg Schäfer et al.	Automatisierte Registrierung und Synchronisierung von Perzeptionsdaten in V2X-Netzwerken
[8]	Local Dynamic Maps: Automatic Validation and Correction of Road Map Features	Jörg Schäfer et al.	Erkennung und Kartierung von Verkehrsschildern in einem UDM-Layer
[9]	Faster Lock-Free Atomic Shared Pointers	Jörg Schäfer	Implementierung zur effizienten Parallelisierung von nebenläufigen Prozessen u.a. in verteilten Systemen

Tabelle 2: Weitere Veröffentlichungen, Websites und Berichte zum Projekt EDDY

Referenz	Titel	Autoren	Veröffentlichte Projektinhalte aus dem Projekt EDDY
[10]	Rechtsfragen der Datenökonomie – Empfehlungen aus der Stakeholderperspektive	Matthias Hartwig et al.	Rechtliche Bewertung von Use-Cases aus dem Projekt
[11]	Inline Anonymizer	Raphael Sauer et al.	Entwicklung des Anonymizers aus dem Fahrzeug der HAW Hamburg
[12]	Sensorsystem zur Erhöhung der Sicherheit des Fahrradverkehrs	Christoph Mohr	Entwicklung der Fahrradsensorik für den VRU Schutz
[13]	EDDY: Urban Dynamic Mapping	Ubilabs	Dashboard mit Visualisierung der Use Cases aus dem Projekt EDDY
[14]	Visualising Dynamic Urban Data	Ubilabs	Showcase zur Datenverarbeitung und Visualisierung

Tabelle 3: Bereitstellung von Daten aus dem Projekt EDDY

Referenz	Titel	Autoren	Veröffentlichte Projektinhalte aus dem Projekt EDDY
[15]	Fahrstreifengenaue Datensatz der Teststrecke für automatisiertes und vernetztes Fahren (TAVF)	Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Verkehr und Mobilitätswende, Philipp Ramm und Jörg Schulz	HD-Karten
[16]	Metadaten	LSBG	Metadatenkatalogeintrag zu EDDY auf Metaver

Bei der mFund Konferenz im September 2022 wurden erste Projektergebnisse im Rahmen eines Workshops präsentiert. Das Gesamtprojekt wurde im Mai 2023 mit einem Messestand auf dem ITS European Congress in Lissabon präsentiert (Abbildung 2). Vorgestellt wurde insbesondere eine Demonstration der *Bedarfsgesteuerten Datenerfassung* basierend auf einer Simulation mit



Abbildung 2: Projektvorstellung auf dem ITS European Congress in Lissabon 2023.

realen Messdaten von der TAVF. Das System wurde zudem erfolgreich am 16. November 2023 mit einem live im Hamburger Verkehr betriebenen Fahrzeug beim LSBG vorgeführt. Am 17. Juni wurde das System potenziell interessierten europäischen Partnern im Rahmen einer Videokonferenz vorgeführt. Im Dezember 2023 präsentierte sich das Projekt EDDY auf der mFund Konferenz in einem Fachforum mit gelungener Vernetzung mit anderen mFund Projekten. Zum Projektende wurde im September 2024 bei der Behörde für Verkehr und Mobilitätswende in Hamburg eine Veranstaltung durchgeführt, bei der die Ergebnisse einem externen und internen Publikum präsentiert wurden. Kern der Veranstaltung waren fachliche Vorträge zum Projekt sowie die Demonstration von Ergebnissen mit verschiedenen Versuchsträgern der jeweiligen Projektpartner (Abbildung 3). Im Zusammenhang mit der Erstellung des Abschlussberichts wird



Abbildung 3: Abschlusspräsentation und -demonstration bei der BVM in Hamburg.

zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts eine weitere wissenschaftliche Veröffentlichung erstellt, die den Zusammenhang von Use-Cases, Ihren Anforderungen und der Auswahl bestimmter Lösungen beleuchtet und so einen Beitrag zur Entwicklung zukünftiger Lösungen liefern soll. Für weitere Konferenzbeiträge und Vernetzungsaktivitäten sei auf den Kommunikationsplan verwiesen, der dem Fördergeber mit der Abschlussdokumentation zur Verfügung gestellt wird.

## A. Übersicht verwendeter Literatur und Standards

Tabelle 4: Überblick der betrachteten Sekundärliteratur zum Digitalen Zwilling

Referenz	Titel	Domäne	Use Cases, Services
[17]	Trends in Digital Twin Framework Architectures for Smart Cities: A Case Study in Smart Mobility	Mobility	Smart Parking, Environmental Behavior Analysis on Traffic Incidents, Emergency Management
[18]	Leveraging Generative AI for Urban Digital Twins: A Scoping Review on the Autonomous Generation of Urban Data, Scenarios, Designs, and 3D City Models for Smart City Advancement	Smart City	Transportation and Mobility, Urban Energy, Urban Water, Building and Infrastructure, Urban Planning and Design
[19]	Survey on digital twins for Internet of Vehicles: Fundamentals, challenges, and opportunities	Mobility	Risk Avoidance, Itinerary Planning, Flow Control, Scheme Simulation, Space Management
[20]	Digital Twin-Enabled Internet of Vehicles Applications	Mobility, Industry	Manufacturing, Driver Assistance, Intelligent Transportation, Resource Administration
[21]	The Hitchhiker's Guide to Fused Twins: A Review of Access to Digital Twins In Situ in Smart Cities	Smart City	Multiple
[22]	Digital Twin Smart Cities for Disaster Risk Management: A Review of Evolving Concepts	Smart City	Disaster Management, Emergency Response Planning
[23]	Developing Human-Centered Urban Digital Twins for Community Infrastructure Resilience: A Research Agenda	Resilience	Complex Decision Making
[24]	The adoption of urban digital twins	Smart City	Urban Operation, Management, Planning
[25]	City Digital Twin Potentials: A Review and Research Agenda	Smart City	Infrastructure, Planning and Transformation, Citizen Engagement, Vulnerability Detection, Performance Assessment, Energy, Disaster Management, Services Management, Elderly Mobility, Health and Well-being, Architecture
[26]	Characterizing the Digital Twin: A systematic literature review	Multiple	Manufacturing, Cars, Farming, Health
[27]	Digital Twin for maintenance: A literature review	Industry	Construction, Naval Engineering, Manufacturing, Energy, Aerospace, Logistics, Hydraulics, Automotion, Railway

Tabelle 5: Überblick der betrachteten Primärliteratur zum Digitalen Zwilling

Referenz	Titel	Domäne	Use Cases, Services
[28]	Toward the Creation of a Digital Twin Authoring Tool: A Smart Mobility Perspective in Smart Cities	Smart City	Traffic, Public Transportation
[29]	A Multi-Modal Simulation Framework to Enable Digital Twin-based V2X Communications in Dynamic Environments	Mobility	Communication Performance Prediction

Referenz	Titel	Domäne	Use Cases, Services
[30]	The effects of infrastructure quality on the usefulness of automated vehicles: A case study for Leeds	Mobility	Road Readiness Index assessment for AVs
[31]	Smart Mobility in the Cloud: Enabling Real-Time Situational Awareness and Cyber-Physical Control Through a Digital Twin for Traffic	Mobility	Situational Awareness, Control
[32]	Smart Mobility Digital Twin Based Automated Vehicle Navigation System: A Proof of Concept.	Mobility	Navigation
[33]	An Edge-Based Digital Twin Framework for Connected and Autonomous Vehicles: Design and Evaluation	Mobility	Prototypical Implementation
[34]	Virtual Reality and Internet of Things Based Digital Twin for Smart City Cross-Domain Interoperability	Smart City	Cross-Domain Smart City Services (lighting, watering, garbage)
[35]	Cooperative Localization in Transportation 5.0	Mobility	Vehicle Localization
[36]	Digital Twins for CCAM Applications – The Case of Augmented CCAM and Beyond	Mobility	Multiple CCAM Applications
[37]	Simulation-based Digital Twin for 5G Connected Automated and Autonomous Vehicles.	Mobility	Cross-Border Connectivity, Cooperative Lane Change
[38]	Mobility Digital Twin: Concept, Architecture, Case Study, and Future Challenges	Mobility	User Management, Driver Classification, Traffic Flow, Variable Speed Limit, DT-based ACC
[39]	Digital Twins for Urban Mobility	Mobility	Urban Mobility, Traffic, Air Quality, Multi-Modal Mobility
[40]	Collaborative City Digital Twin for the COVID-19 Pandemic: A Federated Learning Solution	Resilience	COVID19 Response Plan Management
[41]	Urban Data Platform Hamburg: Integration von Echtzeit IoT-Daten mittels SensorThings API	Smart City	multiple
[42]	Urban Digital Twins for Smart Cities and Citizens: The Case Study of Herrenberg, Germany	Smart City	Urban Planning
[43]	Digital Behavioral Twins for Safe Connected Cars	Mobility	Driver Assistance and Behavior for Highway Driving
[44]	C2PS: A Digital Twin Architecture Reference Model for the Cloud-Based Cyber-Physical Systems	Mobility	Driver Assistance

Tabelle 6: Überblick der betrachteten Literatur zu den Themen Connected Vehicle und Internet of Vehicles

Referenz	Titel	Use Cases, Services
[45]	Sustainable mobility in B5G/6G: V2X technology trends and use cases	Platooning, Routing, Parking, Speed Harmonization, Intersection Control
[46]	A Review: Efficient Transportation—Future Aspects of IoV	- (Architecture)
[47]	Traffic Jam Minimization and Accident Avoidance System Using IoTV	Traffic Jam, Accident Avoidance

Referenz	Titel	Use Cases, Services
[48]	Architectural Design Alternatives Based on Cloud/Edge/Fog Computing for Connected Vehicles	- (Architecture)
[49]	Connected car – driver assistance sensors get connected	Connected Driver Assistance
[50]	Internet of Vehicles: Motivation, Layered Architecture, Network Model, Challenges, and Future Aspects	Multiple, Safety and Management, Business
[51]	Securing Warning Message Dissemination in VANETs using Cooperative Neighbor Position Verification	Cooperative Position Verification
[52]	Integration Challenges of Intelligent Transportation Systems with Connected Vehicle, Cloud Computing, and Internet of Things Technologies	ITS
[53]	Internet of Vehicles: From Intelligent Grid to Autonomous Cars and Vehicular Clouds	Autonomous Driving
[54]	Enhancing GNSS-Based Vehicle Positioning Using DSRC and a Nonlinear Robust Filter under the Connected Vehicles Environment	Positioning

Tabelle 7: Überblick der betrachteten Literatur zur Local Dynamic Map

Referenz	Titel	Use Cases, Services
[55]	Multi-Layered Local Dynamic Map for a Connected and Automated In-Vehicle System	Cooperative Perception
[56]	S-LDM: Server local dynamic map for 5G-based centralized enhanced collective perception	Scalability, Border-Crossings
[57]	Platoon-Local Dynamic Map: Micro cloud support for platooning cooperative perception	cooperative perception, platooning
[58]	iLDM: An Interoperable Graph-Based Local Dynamic Map	Vehicle Discovery Service
[59, 60]	6-Layer Model for a Structured Description and Categorization of Urban Traffic and Environment	Verification and Validation
[48]	Architectural Design Alternatives Based on Cloud/Edge/Fog Computing for Connected Vehicles	- (Architecture)
[61]	DynamicMap 2.0: A Traffic Data Management Platform Leveraging Clouds, Edges and Embedded Systems	Navigation, Traffic Flow Control, Cooperative Perception
[62]	Towards a Semantically Enriched Local Dynamic Map	Consistency Checks, Data Aggregation, Event Detection
[63]	Dynamic Maps for Automated Driving and UAV Geofencing	Real-Time Object Detection, UAV Geofencing
[64]	Vehicular Communication Networks in the Automated Driving Era	Traffic Light Control
[65]	Driving Situation Analysis with Relational Local Dynamic Maps (R-LDM)	Camera-to-Map Alignment, Path-Dependent Risk Estimation

Referenz	Titel	Use Cases, Services
[66]	3D Point Cloud Map Based Vehicle Localization Using Stereo Camera	Localization
[67]	Implementation and Evaluation of Local Dynamic Map in Safety Driving Systems	Collision Detection
[68]	Local Dynamic Map als modulares Software Framework für Fahrerassistenzsysteme	Driver Assistance
[69]	Evidential Distributed Dynamic Map for Cooperative Perception in VANets	Cooperative Perception
[70]	DynaMap: a Dynamic Map for Road side ITS Stations	Visualization, Incident Detection, Dynamic Speed Advice, Shockwave Damping
[71]	High-accurate vehicle localization using digital maps and coherency images	Localization
[72]	World Modeling for Cooperative Intelligent Vehicles	- (Architecture)

Tabelle 8: Überblick der betrachteten Standards

Referenz	Domäne	Titel
[73]	Mobility	Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Local Dynamic Map (LDM)
[74]	Mobility	Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Facilities layer protocols and communication requirements for infrastructure services
[75]	Mobility	Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Local Dynamic Map (LDM); Rationale for and guidance on standardization
[76]	Mobility	Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service
[77]	Smart City	Machine-to-Machine communications (M2M); Impact of Smart City Activity on IoT Environment

## Literaturverzeichnis

- [1] multiple. *OGC API Features website*. URL: <https://www.ogc.org/de/publications/standard/ogcapi-features/> (besucht am 02.02.2025).
- [2] multiple. *GeoServer: Open source server for sharing geospatial data*. URL: <https://geoserver.org> (besucht am 02.02.2025).
- [3] Maximilian Weltz and Rasmus Rettig. “Localization of Autonomous Vehicles in Complex, Urban Environments and the Implementation Based on a Multi-Kalman Approach in Combination with a Local Dynamic Map”. In: Long Beach, California, Feb. 2024, pp. 1143–1157. DOI: [10.33012/2024.19568](https://doi.org/10.33012/2024.19568). URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=19568> (visited on 05/14/2024).
- [4] Rasmus Rettig. URL: <https://navisp.esa.int/page/industry-days-2023>.
- [5] Rasmus Rettig and Maximilian Weltz. “Virtuous, multi-level integration of research and education within the project “European Digital Dynamic Mapping” (EDDY)”. en. In: (2023). ISBN: 9783885797319 Publisher: [object Object]. DOI: [10.18420/INF2023\\_17](https://doi.org/10.18420/INF2023_17). URL: <https://dl.gi.de/handle/20.500.12116/43096> (visited on 05/14/2024).
- [6] Franz Andert et al. “On SLAM as a Service for Self-Driving Cars”. In: *DGON POSNAV, Positioning and Navigation for Intelligent Transport Systems*. 2024.
- [7] Jörg Peter Schäfer, Clarissa Böker, et al. “Spatio-Temporal Alignment between Cooperative Sensor Platforms”. In: *27th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*. 2024. DOI: [10.1109/ITSC58415.2024.10919564](https://doi.org/10.1109/ITSC58415.2024.10919564).
- [8] Jörg Peter Schäfer, Gurucharan Srinivas, and Oliver Böttcher. “Towards Local Dynamic Maps: Automatic Validation and Correction of Road Map Features”. In: *International Conference on Geoinformation Data, Processing and Applications (GeoDPA)*. 2024.
- [9] Jörg Peter Schäfer. “Faster Lock-Free Atomic Shared Pointers”. In: *Science and Information Conference, SAI 2024*, pp. 18–38. DOI: [10.1007/978-3-031-62277-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-62277-9_2).
- [10] Matthias Hartwig. *Rechtsfragen der Datenökonomie – Empfehlungen aus der Stakeholderperspektive*. 2024. URL: <https://www.ikem.de/publikation/rechtsfragen-der-datenoekonomie-empfehlungen-aus-der-stakeholderperspektive/>.
- [11] Raphael Sauer, Tim Vogler und Robin Blessin. *Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW Hamburg)*. Techn. Ber. Inline Anonymizer, 2023.
- [12] Christoph Mohr. *Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW Hamburg)*. Techn. Ber. Sensorsystem zur Erhöhung der Sicherheit des Fahrradverkehrs, 2024.
- [13] ubilabs. *EDDY Dashboard*. URL: <https://eddy-dashboard.ubilabs.dev/>.
- [14] ubilabs. *Showcase: Visualising Dynamic Urban Data*. URL: <https://storage.googleapis.com/ubilabs-digital-twin-showcase/index.html#intro>.
- [15] Philipp Ramm und Jörg Schulz. *Fahrstreifengenaue Datensatz der Teststrecke für automatisiertes und vernetztes Fahren (TAVF)*. URL: <https://metaver.de/trefferanzeige?cmd=doShowDocument&docuuid=56F87047-6755-4BC0-9367-5C9CB4ACD8DF>.

- [16] LSBG. *Metadatenkatalogeintrag zu EDDY auf Metaver*. URL: <https://metaver.de/trefferanzeige?docuuid=55727c84-bf36-4c5e-be52-e9ffbf7b0058>.
- [17] Evanthia Faliagka u. a. „Trends in Digital Twin Framework Architectures for Smart Cities: A Case Study in Smart Mobility“. en. In: *Sensors* 24.5 (März 2024), S. 1665. ISSN: 1424-8220. DOI: [10.3390/s24051665](https://doi.org/10.3390/s24051665). URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/5/1665> (besucht am 12.09.2024).
- [18] Haowen Xu u. a. „Leveraging generative AI for urban digital twins: a scoping review on the autonomous generation of urban data, scenarios, designs, and 3D city models for smart city advancement“. In: *Urban Informatics* 3.1 (Okt. 2024), S. 29. ISSN: 2731-6963. DOI: [10.1007/s44212-024-00060-w](https://doi.org/10.1007/s44212-024-00060-w). URL: <https://doi.org/10.1007/s44212-024-00060-w>.
- [19] Jiajie Guo u. a. „Survey on digital twins for Internet of Vehicles: Fundamentals, challenges, and opportunities“. en. In: *Digital Communications and Networks* 10.2 (Apr. 2024), S. 237–247. ISSN: 23528648. DOI: [10.1016/j.dcan.2022.05.023](https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.05.023). URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S235286482200116X> (besucht am 12.09.2024).
- [20] Junting Gao u. a. „Digital Twin-Enabled Internet of Vehicles Applications“. In: *Electronics* 13.7 (2024). ISSN: 2079-9292. DOI: [10.3390/electronics13071263](https://doi.org/10.3390/electronics13071263). URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/13/7/1263>.
- [21] Jascha Grübel u. a. „The Hitchhiker’s Guide to Fused Twins: A Review of Access to Digital Twins In Situ in Smart Cities“. en. In: *Remote Sensing* 14.13 (Juni 2022), S. 3095. ISSN: 2072-4292. DOI: [10.3390/rs14133095](https://doi.org/10.3390/rs14133095). URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/13/3095> (besucht am 12.09.2024).
- [22] M. R. Mahendrini Fernando Ariyachandra und Gayan Wedawatta. „Digital Twin Smart Cities for Disaster Risk Management: A Review of Evolving Concepts“. en. In: *Sustainability* 15.15 (Aug. 2023), S. 11910. ISSN: 2071-1050. DOI: [10.3390/su151511910](https://doi.org/10.3390/su151511910). URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/15/11910> (besucht am 12.09.2024).
- [23] Xinyue Ye u. a. „Developing Human-Centered Urban Digital Twins for Community Infrastructure Resilience: A Research Agenda“. In: *Journal of Planning Literature* 38.2 (2023), S. 187–199. DOI: [10.1177/08854122221137861](https://doi.org/10.1177/08854122221137861). eprint: <https://doi.org/10.1177/08854122221137861>. URL: <https://doi.org/10.1177/08854122221137861>.
- [24] Jaume Ferré-Bigorra, Miquel Casals und Marta Gangoells. „The adoption of urban digital twins“. en. In: *Cities* 131 (Dez. 2022), S. 103905. ISSN: 02642751. DOI: [10.1016/j.cities.2022.103905](https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103905). URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264275122003444> (besucht am 12.09.2024).
- [25] Ehab Shahat, Chang T. Hyun und Chunho Yeom. „City Digital Twin Potentials: A Review and Research Agenda“. en. In: *Sustainability* 13.6 (März 2021), S. 3386. ISSN: 2071-1050. DOI: [10.3390/su13063386](https://doi.org/10.3390/su13063386). URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/6/3386> (besucht am 12.09.2024).

- [26] David Jones u. a. „Characterising the Digital Twin: A systematic literature review“. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 29 (2020), S. 36–52. ISSN: 1755-5817. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755581720300110>.
- [27] Itxaro Errandonea, Sergio Beltrán und Saioa Arrizabalaga. „Digital Twin for maintenance: A literature review“. In: *Computers in Industry* 123 (2020), S. 103316. ISSN: 0166-3615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103316>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361520305509>.
- [28] Muhammad Umair Hassan, Saleh Abdel-Afou Alaliyat und Ibrahim A. Hameed. „Toward the Creation of a Digital Twin Authoring Tool: A Smart Mobility Perspective in Smart Cities“. en. In: *IEEE Access* 12 (2024), S. 111280–111292. ISSN: 2169-3536. DOI: [10.1109/ACCESS.2024.3442079](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3442079). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10633705/> (besucht am 12.09.2024).
- [29] Lorenzo Cazzella u. a. *A Multi-Modal Simulation Framework to Enable Digital Twin-based V2X Communications in Dynamic Environments*. en. arXiv:2303.06947 [cs, eess]. Juli 2024. URL: <http://arxiv.org/abs/2303.06947> (besucht am 12.09.2024).
- [30] Oguz Tengilimoglu, Oliver Carsten und Zia Wadud. „The effects of infrastructure quality on the usefulness of automated vehicles: A case study for Leeds, UK“. In: *Journal of Transport Geography* 121 (2024), S. 104042. ISSN: 0966-6923. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2024.104042>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966692324002515>.
- [31] Haowen Xu u. a. „Smart Mobility in the Cloud: Enabling Real-Time Situational Awareness and Cyber-Physical Control Through a Digital Twin for Traffic“. en. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 24.3 (März 2023), S. 3145–3156. ISSN: 1524-9050, 1558-0016. DOI: [10.1109/TITS.2022.3226746](https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3226746). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10018121/> (besucht am 12.09.2024).
- [32] Kui Wang u. a. „Smart Mobility Digital Twin Based Automated Vehicle Navigation System: A Proof of Concept“. en. In: *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles* 9.3 (März 2024), S. 4348–4361. ISSN: 2379-8904, 2379-8858. DOI: [10.1109/TIV.2024.3368109](https://doi.org/10.1109/TIV.2024.3368109). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10443037/> (besucht am 12.09.2024).
- [33] Claudia Campolo u. a. „An Edge-Based Digital Twin Framework for Connected and Autonomous Vehicles: Design and Evaluation“. en. In: *IEEE Access* 12 (2024), S. 46290–46303. ISSN: 2169-3536. DOI: [10.1109/ACCESS.2024.3382001](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3382001). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10479492/> (besucht am 12.09.2024).
- [34] Guillermo Del Campo u. a. „Virtual Reality and Internet of Things Based Digital Twin for Smart City Cross-Domain Interoperability“. en. In: *Applied Sciences* 14.7 (März 2024), S. 2747. ISSN: 2076-3417. DOI: [10.3390/app14072747](https://doi.org/10.3390/app14072747). URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/7/2747> (besucht am 12.09.2024).

- [35] Letian Gao u. a. „Cooperative Localization in Transportation 5.0“. en. In: *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles* 9.3 (März 2024), S. 4259–4264. ISSN: 2379-8904, 2379-8858. DOI: [10.1109/TIV.2024.3377163](https://doi.org/10.1109/TIV.2024.3377163). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10472068/> (besucht am 12. 09. 2024).
- [36] Evangelos Bekiaris u. a. „Digital Twins for CCAM Applications – The Case of Augmented CCAM and Beyond“. en. In: *Reliability and Statistics in Transportation and Communication*. Hrsg. von Igor Kabashkin, Irina Yatskiv und Olegas Prentkovskis. Bd. 913. Series Title: Lecture Notes in Networks and Systems. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, S. 3–18. ISBN: 978-3-031-53597-0 978-3-031-53598-7. DOI: [10.1007/978-3-031-53598-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-53598-7_1). URL: [https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-53598-7\\_1](https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-53598-7_1) (besucht am 12. 09. 2024).
- [37] Martina Barbi u. a. „Simulation-based Digital Twin for 5G Connected Automated and Autonomous Vehicles“. en. In: *2022 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*. Grenoble, France: IEEE, Juni 2022, S. 273–278. ISBN: 978-1-6654-9871-5. DOI: [10.1109/EuCNC/6GSummit54941.2022.9815732](https://doi.org/10.1109/EuCNC/6GSummit54941.2022.9815732). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9815732/> (besucht am 12. 09. 2024).
- [38] Ziran Wang u. a. „Mobility Digital Twin: Concept, Architecture, Case Study, and Future Challenges“. In: *IEEE Internet of Things Journal* 9.18 (Sep. 2022). Conference Name: IEEE Internet of Things Journal, S. 17452–17467. ISSN: 2327-4662. DOI: [10.1109/JIOT.2022.3156028](https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3156028). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9724183> (besucht am 11. 09. 2024).
- [39] Chiara Bachechi. „Digital Twins for Urban Mobility“. In: *New Trends in Database and Information Systems*. Hrsg. von Silvia Chiusano u. a. Cham: Springer International Publishing, 2022, S. 657–665. ISBN: 978-3-031-15743-1.
- [40] Junjie Pang u. a. „Collaborative city digital twin for the COVID-19 pandemic: A federated learning solution“. en. In: *Tsinghua Science and Technology* 26.5 (Okt. 2021), S. 759–771. ISSN: 1007-0214. DOI: [10.26599/TST.2021.9010026](https://doi.org/10.26599/TST.2021.9010026). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9409764/> (besucht am 12. 09. 2024).
- [41] Michael Fischer. „Urban Data Platform Hamburg: Integration von Echtzeit IoT-Daten mittels SensorThings API“. de. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 1/2021 (2021), S. 47–56. ISSN: 1618-8950. DOI: [10.12902/zfv-0330-2020](https://doi.org/10.12902/zfv-0330-2020). URL: <https://doi.org/10.12902/zfv-0330-2020> (besucht am 12. 09. 2024).
- [42] Fabian Dembski u. a. „Urban Digital Twins for Smart Cities and Citizens: The Case Study of Herrenberg, Germany“. en. In: *Sustainability* 12.6 (März 2020), S. 2307. ISSN: 2071-1050. DOI: [10.3390/su12062307](https://doi.org/10.3390/su12062307). URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/6/2307> (besucht am 12. 09. 2024).
- [43] Ximing Chen u. a. „Digital Behavioral Twins for Safe Connected Cars“. In: *Proceedings of the 21th ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems*. MODELS '18. Copenhagen, Denmark: Association for Computing Machi-

- nery, 2018, S. 144–153. ISBN: 9781450349499. DOI: [10.1145/3239372.3239401](https://doi.org/10.1145/3239372.3239401). URL: <https://doi.org/10.1145/3239372.3239401>.
- [44] Kazi Masudul Alam und Abdulmotaleb El Saddik. „C2PS: A Digital Twin Architecture Reference Model for the Cloud-Based Cyber-Physical Systems“. In: *IEEE Access* 5 (2017), S. 2050–2062. DOI: [10.1109/ACCESS.2017.2657006](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2657006).
- [45] Sandra Roger u. a. „Sustainable Mobility in B5G/6G: V2X Technology Trends and Use Cases“. In: *IEEE Open Journal of Vehicular Technology* 5 (2024), S. 459–472. DOI: [10.1109/OJVT.2024.3375451](https://doi.org/10.1109/OJVT.2024.3375451).
- [46] Ajay Dureja und Suman Sangwan. „A Review: Efficient Transportation—Future Aspects of IoV“. In: *Evolving Technologies for Computing, Communication and Smart World*. Hrsg. von Pradeep Kumar Singh u. a. Singapore: Springer Singapore, 2021, S. 97–108. ISBN: 978-981-15-7804-5.
- [47] Mohsin Khan und Bhavna Arora. „Traffic Jam Minimization and Accident Avoidance System Using IoT“. In: *Evolving Technologies for Computing, Communication and Smart World*. Hrsg. von Pradeep Kumar Singh u. a. Singapore: Springer Singapore, 2021, S. 39–51. ISBN: 978-981-15-7804-5.
- [48] Haoxin Wang u. a. „Architectural Design Alternatives Based on Cloud/Edge/Fog Computing for Connected Vehicles“. In: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 22.4 (2020), S. 2349–2377. DOI: [10.1109/COMST.2020.3020854](https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3020854).
- [49] Stephan Stass u. a. „Connected car – driver assistance sensors get connected“. In: *Fahrerassistenzsysteme 2017*. Hrsg. von Rolf Isermann. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017, S. 173–185. ISBN: 978-3-658-19059-0.
- [50] Omprakash Kaiwartya u. a. „Internet of Vehicles: Motivation, Layered Architecture, Network Model, Challenges, and Future Aspects“. In: *IEEE Access* 4 (2016), S. 5356–5373. DOI: [10.1109/ACCESS.2016.2603219](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2603219).
- [51] Manuel Fogue u. a. „Securing Warning Message Dissemination in VANETs Using Cooperative Neighbor Position Verification“. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 64.6 (2015), S. 2538–2550. DOI: [10.1109/TVT.2014.2344633](https://doi.org/10.1109/TVT.2014.2344633).
- [52] Juan Antonio Guerrero-ibanez, Sherali Zeadally und Juan Contreras-Castillo. „Integration challenges of intelligent transportation systems with connected vehicle, cloud computing, and internet of things technologies“. In: *IEEE Wireless Communications* 22.6 (2015), S. 122–128. DOI: [10.1109/MWC.2015.7368833](https://doi.org/10.1109/MWC.2015.7368833).
- [53] Mario Gerla u. a. „Internet of vehicles: From intelligent grid to autonomous cars and vehicular clouds“. In: *2014 IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. 2014, S. 241–246. DOI: [10.1109/WF-IoT.2014.6803166](https://doi.org/10.1109/WF-IoT.2014.6803166).

- [54] Liu Jiang, Cai Bai-gen und Wang Jian. „Enhancing GNSS-Based Vehicle Positioning Using DSRC and a Nonlinear Robust Filter under the Connected Vehicles Environment“. In: *Internet of Vehicles – Technologies and Services*. Hrsg. von Robert C.-H. Hsu und Shang-guang Wang. Cham: Springer International Publishing, 2014, S. 110–119. ISBN: 978-3-319-11167-4.
- [55] Sebastiano Taddei u. a. „Multi-Layered Local Dynamic Map for a Connected and Automated In-Vehicle System“. In: *Sustainability* 16.3 (2024). ISSN: 2071-1050. DOI: [10.3390/su16031306](https://doi.org/10.3390/su16031306). URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/3/1306>.
- [56] C.M. Risma Carletti u. a. „S-LDM: Server local dynamic map for 5G-based centralized enhanced collective perception“. In: *Vehicular Communications* 49 (2024), S. 100819. ISSN: 2214-2096. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2024.100819>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214209624000949>.
- [57] Carlos Mateo Risma Carletti u. a. „Platoon-Local Dynamic Map: Micro cloud support for platooning cooperative perception“. In: *2023 19th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*. 2023, S. 405–410. DOI: [10.1109/WiMob58348.2023.10187883](https://doi.org/10.1109/WiMob58348.2023.10187883).
- [58] Mikel García u. a. „iLDM: An Interoperable Graph-Based Local Dynamic Map“. en. In: *Vehicles* 4.1 (Jan. 2022). Publisher: MDPI AG, S. 42–59. ISSN: 2624-8921. DOI: [10.3390/vehicles4010003](https://doi.org/10.3390/vehicles4010003). URL: <https://www.mdpi.com/2624-8921/4/1/3> (besucht am 17.09.2024).
- [59] Maike Scholtes u. a. „6-Layer Model for a Structured Description and Categorization of Urban Traffic and Environment“. en. In: *IEEE Access* 9 (2021). Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), S. 59131–59147. ISSN: 2169-3536. DOI: [10.1109/access.2021.3072739](https://doi.org/10.1109/access.2021.3072739). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9400833/> (besucht am 17.09.2024).
- [60] multiple. *Home - pegasus-EN*. URL: <https://www.pegasusprojekt.de/en/home> (besucht am 17.09.2024).
- [61] Yousuke Watanabe, Kenya Sato und Hiroaki Takada. „DynamicMap 2.0: A Traffic Data Management Platform Leveraging Clouds, Edges and Embedded Systems“. In: *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research* 18.1 (Jan. 2020), S. 77–89. ISSN: 1868-8659. DOI: [10.1007/s13177-018-0173-7](https://doi.org/10.1007/s13177-018-0173-7). URL: <https://doi.org/10.1007/s13177-018-0173-7>.
- [62] Thomas Eiter u. a. „Towards a Semantically Enriched Local Dynamic Map“. en. In: *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research* 17.1 (Jan. 2019). Publisher: Springer Science and Business Media LLC, S. 32–48. ISSN: 1348-8503, 1868-8659. DOI: [10.1007/s13177-018-0154-x](https://doi.org/10.1007/s13177-018-0154-x). URL: <http://link.springer.com/10.1007/s13177-018-0154-x> (besucht am 17.09.2024).

- [63] Mariem Maiouak und Tarik Taleb. „Dynamic Maps for Automated Driving and UAV Geofencing“. en. In: *IEEE Wireless Communications* 26.4 (Aug. 2019). Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), S. 54–59. ISSN: 1536-1284, 1558-0687. DOI: [10.1109/mwc.2019.1800544](https://doi.org/10.1109/mwc.2019.1800544). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8809660/> (besucht am 17.09.2024).
- [64] Shan Zhang u. a. „Vehicular Communication Networks in the Automated Driving Era“. In: *IEEE Communications Magazine* (2018). DOI: [10.1109/MCOM.2018.1701171](https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1701171).
- [65] Julian Eggert u. a. „Driving Situation Analysis with Relational Local Dynamic Maps (R-LDM)“. en. In: *Society of Automotive Engineers of Japan (JSAE)* (2017). URL: <https://tech.jsae.or.jp/paperinfo/en/content/conf2017-02.022/>.
- [66] Yuquan Xu u. a. „3D Point Cloud Map Based Vehicle Localization Using Stereo Camera“. In: *Proceedings of the 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium* (2017).
- [67] Hideki Shimada u. a. „Implementation and Evaluation of Local Dynamic Map in Safety Driving Systems“. en. In: *Journal of Transportation Technologies* 05.02 (2015). Publisher: Scientific Research Publishing, Inc., S. 102–112. ISSN: 2160-0473, 2160-0481. DOI: [10.4236/jtts.2015.52010](https://doi.org/10.4236/jtts.2015.52010). URL: <http://www.scirp.org/journal/doi.aspx?DOI=10.4236/jtts.2015.52010> (besucht am 17.09.2024).
- [68] P. Reisdorf, A. Auerswald und G. Wanielik. „Local Dynamic Map als modulares Software Framework für Fahrerassistenzsysteme“. In: *Advances in Radio Science* 13 (2015), S. 203–207. DOI: [10.5194/ars-13-203-2015](https://doi.org/10.5194/ars-13-203-2015). URL: <https://ars.copernicus.org/articles/13/203/2015/>.
- [69] Nicole El Zoghby, Véronique Cherfaoui und Thierry Denoeux. „Evidential distributed dynamic map for cooperative perception in VANets“. In: *2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings*. 2014, S. 1421–1426. DOI: [10.1109/IVS.2014.6856550](https://doi.org/10.1109/IVS.2014.6856550).
- [70] Bart Netten u. a. „DynaMap: a Dynamic Map for Road side ITS Stations, TS129“. In: *Proceedings of the 20th ITS World congress* (2013).
- [71] Norman Mattern, Robin Schubert und Gerd Wanielik. „High-accurate vehicle localization using digital maps and coherency images“. en. In: *2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. La Jolla, CA, USA: IEEE, Juni 2010. DOI: [10.1109/ivs.2010.5547974](https://doi.org/10.1109/ivs.2010.5547974). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5547974/> (besucht am 17.09.2024).
- [72] Z. Papp, C. Brown und C. Bartels. „World modeling for cooperative intelligent vehicles“. In: *2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. 2008, S. 1050–1055. DOI: [10.1109/IVS.2008.4621272](https://doi.org/10.1109/IVS.2008.4621272).
- [73] *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Local Dynamic Map (LDM) V1.1.1 (2014-09)*. Techn. Ber. European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2014.

- [74] *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Facilities layer protocols and communication requirements for infrastructure services; Release 2*. Techn. Ber. European Telecommunications Standards Institute (ETSI) V2.1.1 (2021-03), 2021.
- [75] *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Local Dynamic Map (LDM); Rationale for and guidance on standardization*. Techn. Ber. European Telecommunications Standards Institute (ETSI) V1.1.1 (2011-6), 2011.
- [76] *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service*. Techn. Ber. European Telecommunications Standards Institute (ETSI) V1.4.1 (2019-04), 2019.
- [77] *Machine-to-Machine communications (M2M); Impact of Smart City Activity on IoT Environment*. Techn. Ber. European Telecommunications Standards Institute (ETSI) V1.1.1 (2015-04), 2015.



# EUROPEAN DIGITAL DYNAMIC MAPPING (EDDY)

BMDV mFUND – Förderkennzeichen 01F2208

## Abschlussbericht

confidential vertraulich     restricted beschränkt     public öffentlich

29. April 2025



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Beitragende zum Bericht

Ansprechpartner zum Bericht der jeweiligen Organisation sind farblich hervorgehoben, E-Mail Adressen sind hinterlegt.

<b>Organisation</b>	<b>Name</b>
consider it GmbH (considerIt)	<a href="#">Mark Hebbel</a>
consider it GmbH (considerIt)	Florian Steffens
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW)	<a href="#">Rasmus Rettig</a>
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW)	Maximilian Weltz
Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e. V. (IKEM)	<a href="#">Matthias Hartwig</a>
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V (DLR)	Franz Andert
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V (DLR)	Lukas Merk
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V (DLR)	<a href="#">Michael Scholz</a>
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V (DLR)	Gurucharan Srinivas
Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung Hamburg (LGV)	<a href="#">Philipp Ramm</a>
Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung Hamburg (LGV)	Jörg Schulz
Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer Hamburg (LSBG)	<a href="#">Nils Gayer</a>
Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer Hamburg (LSBG)	Maren Link
OECON Products & Services GmbH (Oecon)	<a href="#">Jens Bläsche</a>
Ubilabs GmbH (Ubi)	<a href="#">Achim Tack</a>

# Inhaltsverzeichnis

<b>Akronyme</b>	<b>6</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>8</b>
<b>2. Vision</b>	<b>11</b>
<b>3. Anforderungsanalyse</b>	<b>12</b>
<b>4. HD-Karten</b>	<b>13</b>
4.1. Digitalisierung der TAVF . . . . .	14
4.2. Entwicklung eines eigenen Konverters für OpenDRIVE . . . . .	15
<b>5. Von Use-Case-Beschreibungen zur Systemarchitektur</b>	<b>17</b>
5.1. Use Case: Verbesserte Fahrzeug-Lokalisierung . . . . .	20
5.2. Use Case: Erkennung und Lokalisierung von Verkehrsinfrastrukturobjekten . . . . .	26
5.3. Use Case: Bedarfsgesteuerte Datenerfassung . . . . .	30
5.4. Use Case: Kontinuierliche sensorgestützte Datenerfassung . . . . .	33
5.5. Use Case: V2X-Nachrichten über zentralen Server . . . . .	35
5.6. Use Case: V2X zum Schutz vulnerabler Verkehrsteilnehmender (Kollisionswar- nungen) . . . . .	41
5.7. Use Case: Aggregation von V2X- und Sensordaten . . . . .	43
<b>6. Datenverarbeitung außerhalb der Urban Dynamic Map</b>	<b>49</b>
<b>7. Abschließende Betrachtung der Systemarchitektur</b>	<b>51</b>
7.1. Optimierungspotenzial durch Reduzieren der Anzahl technischer Komponenten . . . . .	53
7.2. Optimierungspotenzial durch Weiterentwicklung des Point Cloud Service . . . . .	54
7.3. Potenzial zur Verarbeitung von Wetterdaten über Grid Map Service . . . . .	55
<b>8. Handlungsempfehlungen</b>	<b>56</b>
8.1. Handlungsempfehlung 1: Einbeziehen von Fahrzeugherstellern . . . . .	56
8.2. Handlungsempfehlung 2: Beteiligung an Harmonisierung . . . . .	56
8.3. Handlungsempfehlung 3: Anpassen der rechtlichen Rahmenbedingungen . . . . .	57
8.4. Handlungsempfehlung 4: Entwicklung entlang von Use Cases . . . . .	58
8.5. Handlungsempfehlung 5: Fokus auf ausgewählte Use Cases . . . . .	58
8.6. Handlungsempfehlung 6: Nutzung stadteigener Fahrzeugflotten . . . . .	59
8.7. Handlungsempfehlung 7: Sondernutzungserlaubnis als Anreiz zur Datenbereitstel- lung . . . . .	59
8.8. Handlungsempfehlung 8: Zur Nutzung der Urban Data Platform . . . . .	59
8.9. Handlungsempfehlung 9: Zum Umgang mit Datenschutz . . . . .	60
8.10. Handlungsempfehlung 10: Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit . . . . .	61
8.11. Handlungsempfehlung 11: Prüfen von alternativen privaten Angeboten . . . . .	62

8.12. Handlungsempfehlung 12: Sicherstellen einer Zeitsynchronisierung für Eingangsdaten zur serverseitigen Datenverarbeitung . . . . .	63
<b>9. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>63</b>
<b>A. Anforderungskatalog</b>	<b>68</b>
<b>B. User Stories</b>	<b>70</b>
B.1. User Story 2.1: LiDAR-Navigation via UDM-Karten . . . . .	70
B.2. User Story 2.2: Landmarken-Navigation via UDM-Karten . . . . .	71
B.3. User Story 2.3a: Trigger-basierte Datenerfassung nach Interessensgebiet . . . . .	72
B.4. User Story 2.3b: Trigger-basierte Datenerfassung nach Objekttyp . . . . .	72
B.5. User Story 2.4: Fahrzeugseitige Änderungsdetektion an Baustellenbaken . . . . .	73
B.6. User Story 3.1: Erfassen und Versenden dynamischer Objektdaten . . . . .	74
B.7. User Story 3.2: Dynamische Objekte senden Eigeninformationen an UDM . . . . .	74
B.8. User Story 3.3: Weiterleitung von V2X-Nachrichten in die UDM . . . . .	75
B.9. User Story 4.1: Aggregation von dynamischen V2X-Daten . . . . .	75
B.10. User Story 4.1.1: Ableiten von relativen abbiegenden Verkehrsflüssen im Kreuzungsbereich aus dynamischen V2X-Daten . . . . .	76
B.11. User Story 4.2: Aggregation dynamischer Verkehrsteilnehmersensordaten . . . . .	77
B.12. User Story 4.2.1: Automatisches Erzeugen von Spatial Issues aus Schlaglochinformationen . . . . .	77
B.13. User Story 4.3: Bereitstellen dynamischer Regenradar-Daten über UDM . . . . .	78
B.14. User Story 4.4: Dashboard zur Datenvisualisierung . . . . .	78
B.15. User Story 4.5: Dashboard Datenvisualisierung von Curb Side Management . . . . .	79
<b>C. Klassendiagramme und Datenmodelldetails</b>	<b>79</b>
C.1. Klassendiagramm zur Übertragung von LiDAR-Punktwolken . . . . .	79
C.2. Klassendiagramm für die Landmarken-Navigation . . . . .	80
C.3. Klassendiagramm für die bedarfsgesteuerte Datenerfassung . . . . .	81
C.4. Datenmodelldetails zum Austausch von V2X-Nachrichten mit der UDM . . . . .	81
<b>D. Gegenüberstellung unterschiedlicher Aggregationsvarianten</b>	<b>82</b>
<b>E. Architecture Decision Records (ADR)</b>	<b>85</b>
E.1. ADR 001: OGC API Features zum Abfragen und Übertragen statischer Geodaten	85
E.2. ADR 002: OGC SensorThings API zum Übertragen dynamischer Messdaten . . .	86
E.3. ADR 003: OGC Web Coverage Service zum Übertragen von Grid-Daten . . . . .	87
E.4. ADR 004: AMQP zum Übertragen von V2X-Nachrichten . . . . .	89
E.5. ADR 005: Geodätisches Koordinatenreferenzsystem für Vektordaten auf Datenhaltungsseite . . . . .	90
E.6. ADR 006: CAM-Version 1.4.1 . . . . .	91
E.7. ADR 007: CPM-Version 2.1.1 . . . . .	92
E.8. ADR 008: Apache Flink für Aggregation dynamischer Daten . . . . .	93

E.9. ADR 009: ROS-Punktwolkenmodell zum Übertragen von LiDAR-Daten als Flat- Buffers . . . . .	94
E.10.ADR 010: OGC Web Coverage Service zum Bereitstellen von Regenradardaten über GeoServer . . . . .	95
E.11.ADR 011: H3-DGGS-Vektormodell für statistische Aggregation . . . . .	96
<b>F. Austausch mit mFUND-Projekt INFRASense</b>	<b>98</b>

## **Akronyme**

**AMQP** Advanced Message Queuing Protocol.

**ASN.1** Abstract Syntax Notation One.

**CAM** Cooperative Awareness Message.

**COPC** Cloud-Optimised Point Cloud.

**CPM** Collective Perception Message.

**DENM** Decentralized Environmental Notification Message.

**DGGS** Discrete Global Grid System.

**DSA** Digital Safety Assistant.

**DSGVO** Datenschutzgrundverordnung.

**DWD** Deutscher Wetterdienst.

**EDDY** European Digital Dynamic Mapping.

**GIS** Geoinformationssystem.

**GNSS** Global Navigation Satellite System.

**HD** High Definition.

**HEAT** Hamburg Electric Autonomous Transportation.

**IMU** Inertial Measurement Unit.

**ITS-G5** WLAN nach Standard 802.11p.

**JSON** JavaScript Object Notation.

**LDM** Local Dynamic Map.

**LiDAR** Light Detection and Ranging.

**OD** Operational Domain.

**ODD** Operational Design Domain.

**OGC** Open Geospatial Consortium.

**ROS** Robot Operating System.

**TAVF** Teststrecke für Vernetztes und Automatisiertes Fahren.

**UAV** Unmanned Aerial Vehicle.

**UDM** Urban Dynamic Map.

**UDP** Urban Data Platform.

**UPER** Unaligned Packed Encoding Rules.

**V2X** Vehicle to Everything.

**WCS** Web Coverage Service.

**WFS** Web Feature Service.

**WMS** Web Map Service.

**XML** Extensible Markup Language.

# 1. Einleitung

Automatisierte und autonome Fahrzeuge benötigen für die Funktion ihrer Systeme umfangreiche, detaillierte, präzise und aktuelle Daten zum Straßenraum in dem sie sich bewegen. Dazu gehören Informationen zum Straßennetzwerk, detaillierte Informationen zur Straßenverkehrsordnung (StVO) sowie zu Objekten und Landmarken entlang der Straße. Aus diesem Grund sind sie meist mit umfangreicher Bordsensorik ausgestattet, beispielsweise mit Kameras und Light Detection and Ranging (LiDAR). Die so gewonnenen Informationen werden im Fahrzeug in der Local Dynamic Map (LDM) [1] zusammengeführt, einer Karte, die die unterschiedlichen Fahrsysteme mit den jeweils benötigten Daten versorgt. Die mit der fahrzeugeigenen Sensorik erfassten Daten sind allerdings selten vollständig, da beispielsweise Teile des Sichtfeldes von anderen Verkehrsteilnehmenden verdeckt werden können. Des Weiteren werden zur optimalen Trajektorien- und Routenplanungen Daten benötigt, die sich außerhalb der Reichweite der Fahrzeugsensorik befinden.

Die Idee im Projekt European Digital Dynamic Mapping (EDDY) war es, ein System zu schaffen, das in der Lage ist, diese Informationslücke zu schließen und vernetzte Fahrzeuge fortlaufend und in Echtzeit mit den benötigten Daten zu versorgen. Der gewählte Ansatz baut auf dem Konzept der LDM auf und erweitert es um Crowd-Sourcing- und Data-Sharing-Komponenten. Statt die Daten nur lokal im Fahrzeug zu speichern, sollen sie über eine geteilte, gemeinsame Karte anderen Verkehrsteilnehmenden zugänglich gemacht werden. Gleichzeitig können Daten der so entstandenen mobilen Sensorflotte anderen Zwecken im Bereich des Verkehrsmanagement, der Verkehrssteuerung oder darüber hinaus zugeführt werden. Um die Ähnlichkeit zur LDM zu unterstreichen und den erweiterten Horizont deutlich zu machen, wird das System in EDDY Urban Dynamic Map (UDM) genannt. Abbildung 1 stellt schematisch die in der UDM enthaltenen Datenebenen dar. In Anlehnung an das Konzept der LDM können die Daten anhand ihrer Dynamik klassifiziert werden.

Der Datenaustausch mit der UDM erfolgt über das Internetprotokoll (IP), welches entsprechend eine Mobilfunkverbindung bei Nutzern im Feld voraussetzt. Anders als zum Beispiel mit WLAN nach Standard 802.11p (ITS-G5), lässt sich diese Verbindung ohne dedizierte Hardware herstellen. Insbesondere vulnerablen Verkehrsteilnehmenden bietet sich so eine einfache Teilhabe mit bereits vorhandener Technologie. Die Entwicklung entsprechender Smartphone-Applikationen stand allerdings nicht im Vordergrund des Projekts.

Die öffentliche Verwaltung, im Projekt am Beispiel der Freien und Hansestadt Hamburg, fungiert als Bereitstellerin des Dienstes und hat in dieser Rolle neben der eben erwähnten Datennutzung im Bereich Verkehrsmanagement und Verkehrssteuerung die Möglichkeit, die Nutzung ihrer Verkehrsinfrastruktur durch das Bereitstellen von Daten gezielt zu steuern. Auf diese Weise kann dem Verlust der digitalen und damit letztlich auch physischen Hoheit über die Infrastruktur entgegengewirkt werden, die sich zuletzt immer mehr bei privaten Kartendienstleistern in monopolartiger Stellung konzentrierte. Die Kombination aus Datengewinnung und -Bereitstellung bietet der öffentlichen Verwaltung neue Möglichkeiten, ihre Aufgaben im Bereich Verkehrsmanagements und -Ingenieurwesens effektiver und effizienter zu gestalten. Beispielsweise kann durch die Aggregation von Fahrzeugdaten die Verkehrsdichte ermittelt werden. Deren Publikati-

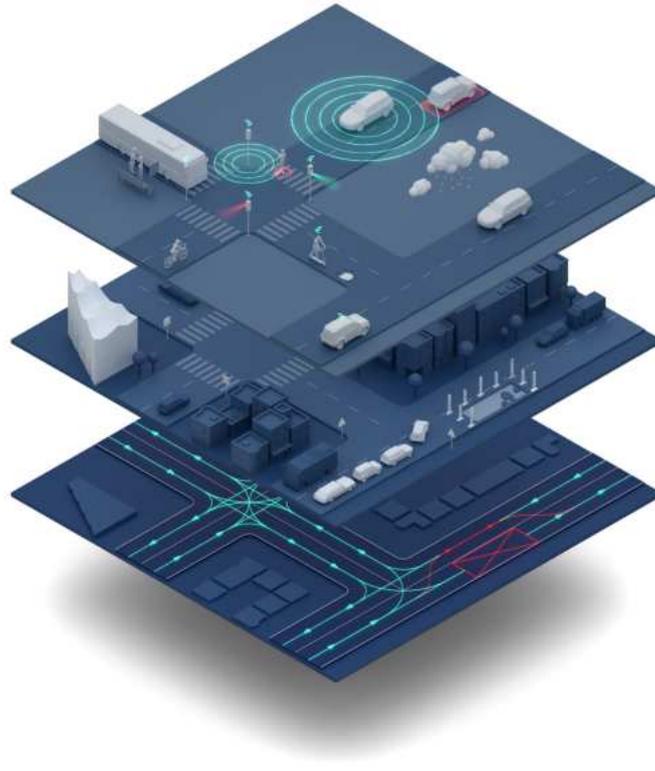


Abbildung 1: Konzept der Urban Dynamic Map (UDM) im Projekt EDDY mit von unten nach oben zunehmender Dynamik der Daten

on über die UDM kann perspektivisch zusammen mit Informationen zu Ausweichrouten genutzt werden, um den Verkehrsfluss gezielt auf geeignete Bahnen zu lenken und Verkehrsknoten zu entlasten.

Wie der Name nahelegt, wurde die UDM zu Anfang des Projekts als Karte mit statischen und dynamischen Anteilen aufgefasst. Das ist nicht falsch, suggeriert aber ein homogenes Datenmodell und eine zentrale Datenbereitstellung über eine einzige Schnittstelle. Während man eingangs davon ausging, dass aus parallelen Ansätzen wie [C-ROADS](#), [ASAM](#) oder [OGC](#) ein abgestimmtes Datenmodell hervorgehen könnte, hat sich im Projektverlauf herausgestellt, dass die betrachteten Daten hinsichtlich der Anforderungen zu Erfassung, Verarbeitung und Bereitstellung so unterschiedlich sind, dass eine homogene Beschreibung und Klassifizierung umständlich und nicht effizient ist. Aus diesem Grund wurde für die UDM kein einheitliches Datenmodell im Sinne eines allgemeingültigen, formalen Klassenmodells entwickelt. Stattdessen werden die unterschiedlichen Daten ihrer Verarbeitungscharakteristik nach geclustert und in geeigneten Formaten und über passende Schnittstellen auf effiziente Weise bereitgestellt. Wann immer möglich wird dabei auf existierende und etablierte Standards zurückgegriffen, die idealerweise ihr jeweiliges Datenmodell vorgeben. So besteht die UDM am Ende aus mehreren miteinander verknüpften Komponenten für die individuellen Datenverarbeitungszwecke.

Die resultierende Systemarchitektur besteht aus 5 Komponenten und wird in Kapitel 5 vorgestellt. In Folge sehen wir die UDM weniger als Karte sondern als Datenplattform an. Wie diese sich von der bereits existierenden Urban Data Platform (UDP) abgrenzt, wird in Abschnitt 8.8

beleuchtet.

Die Komponenten der UDM sind weitestgehend modular und können unabhängig voneinander betrieben werden. Für den öffentlichen Betreiber besteht so die Möglichkeit, das System auf die vorhandene Datenlage und zu unterstützende Use Cases anzupassen. Auf die Use Cases wird in Kapitel 5 näher eingegangen. Die realisierten Use Cases sind als exemplarisch zu verstehen. Es wurde eine Auswahl getroffen, die den Schwerpunkten und der strategischen Ausrichtung der Projektpartner gerecht wird und die drei Anwendungsfelder *Verbesserte Trajektorien- und Routenplanung im Fahrzeug*, *Datenverwertung beim öffentlichen Betreiber* und *Schutz von vulnerablen Verkehrsteilnehmenden* abdeckt. Die UDM bietet darüber hinaus eine Vielzahl von weiteren denkbaren Use Cases, die mit variierendem Aufwand in die bestehende Architektur integriert werden können. Durch die Modularität ist auch eine Erweiterung des Architektur- bzw. des Datenmodells denkbar, was das Spektrum an möglichen Use Cases weiter potenziert.

Die UDM wurde als System ohne (End-)nutzeranwendungen entworfen. Datenprozessierung stellt zwar ein essentielles Feature der UDM dar, die Interpretation, Visualisierung oder Verschneidung mit anderen Datensätzen für den Nutzer obliegt aber externen Anwendungen im Fahrzeug, im Web, auf dem mobilen Endgerät oder auf dem Desktop. Nicht immer ist diese Abgrenzung trennscharf auch weil es denkbar ist, dass Betreibende der UDM gleichzeitig Herausgebende von Nutzeranwendungen sind.

Für die Stadt Hamburg kann die UDM eine wichtige Rolle in der [Strategie Digitale Mobilität \(SDM\)](#) spielen. Dort findet sie sich insbesondere im Entwicklungspfad *Kooperative Systeme* wieder. Ein System wie die UDM bietet über die Internetverbindung per Mobilfunk neue Kommunikationspfade zum Datenaustausch zwischen Infrastruktur und Verkehrsteilnehmenden. In dieser Funktion findet sich die UDM auch im Entwicklungspfad *Mobilitätswillinge* wieder. Dort wird festgehalten, dass es nicht nur einen zentralen Mobilitätswilling geben soll, sondern ein föderiertes System aus aufgabenspezifischen Mobilitätswillingen. Die UDM nimmt die Aufgabe war, Verkehrsteilnehmende mit Mobilitätsdaten zu versorgen und kann im Gegenzug die anderen Zwillinge des föderierten Netzwerks mit Daten versorgen, die durch die Verkehrsteilnehmenden gewonnen werden. Weitere Berührungspunkte mit der Strategie hat die UDM durch die Möglichkeit, enthaltene Daten anderen Stellen der öffentlichen Verwaltung zur Verfügung zu stellen, beispielsweise zu den Entwicklungspfaden *Verkehrsmanagement*, *Mobilitätsplattform* und *Erhaltungsmanagement*.

In EDDY wird letztlich der Versuch unternommen, Domänengrenzen im Bereich der Mobilität aufzulösen und Themen wie *Local Dynamic Map*, *Internet of Vehicles* und *Digitale Zwillinge* in einem System zusammenzuführen um damit bislang ungehobene Synergien zu realisieren.

Die Initialisierung von EDDY wurde erheblich durch die Erfahrungen der Stadt, insbesondere des Landesbetriebs Geoinformation und Vermessung in dem Projekt Hamburg Electric Autonomous Transportation (HEAT) motiviert, in dem die Bedeutung und Herausforderungen im Bezug auf hochaufgelöste Kartendaten deutlich wurden. Wenn auch die Erreichbarkeit der UDM durch die Verwendung der Internetschnittstelle nicht räumlich begrenzt ist, wurde sich in EDDY für die Datenerfassung auf die Teststrecke für Vernetztes und Automatisiertes Fahren (TAVF) konzentriert. Dort sind Lichtsignalanlagen mit Technologie zur Direktkommunikation mit vernetzten Fahrzeugen (ITS-G5) ausgestattet. Die Kombination der beiden Kommunikationskanäle

stellt einen wichtigen Schritt in Richtung hybrider Kommunikation dar.

## 2. Vision

Wie bereits in der Einleitung beschrieben, kann die UDM das Bindeglied zwischen Verkehrsteilnehmenden und der öffentlichen Verwaltung sein und beide Seite mit Daten versorgen, um Einblicke in den Straßenverkehr zu geben, die ansonsten nicht oder nur schwer zugänglich sind, sowohl hinsichtlich des Echtzeitgeschehens als auch bezüglich langfristiger Entwicklungen. Verkehrsteilnehmende schließt dabei ausdrücklich vulnerable Gruppen wie Fußgänger und Radfahrende ein. Diese können aufgrund von technologischen Hürden und des momentanen Fokus auf motorisierten Verkehr ansonsten nur selten von intelligenten Verkehrssystemen profitieren.

In diesem Abschnitt soll die Vision einer vollintegrierten UDM skizziert werden. Unter der Annahme eines hohen Vernetzungsgrades stellt die UDM ein Abbild des Echtzeitverkehrs dar – einen digitalen Mobilitätswilling. Dieser erlaubt es Fahrzeugen unter anderem, sich präzise zu lokalisieren, auch unabhängig vom lokalen Empfang des Global Navigation Satellite System (GNSS), und damit sicher und effizient zu manövrieren. Durch die präzise Eigenlokalisierung weisen die mit der Fahrzeugsensorik erfassten Daten eine hohe Qualität auf. Die zur Lokalisierung notwendigen Daten werden mit Hilfe von statistischen Prozessen durch die Nutzerschaft selbst bereitgestellt. Gleiches gilt für die genaue Führung durch Baustellen, lokale Informationen zur Fahrbahnbeschaffenheit oder zum Wetter und für weitere Daten.

Die Datenerfassung beschränkt sich nicht nur auf die Fahrbahn, sondern erstreckt sich auf die Rad- und Fußwege und den Straßenebenraum. Bildgebende Fahrzeugsensorik mit entsprechender Abdeckung kann hier von der Fahrbahn aus einen wertvollen Beitrag leisten. Viel Potential bieten in dieser Hinsicht bspw. auch die vermehrt aufkommenden Lieferroboter. Hindernisse können so frühzeitig und automatisiert erfasst und an die Betroffenen über die UDM weitergegeben werden.

Für Radfahrer und andere Gruppen von vulnerablen Verkehrsteilnehmenden wird die Fortbewegung durch den Einsatz der UDM deutlich sicherer werden. Sie profitieren passiv davon, dass ihre Position anderen Verkehrsteilnehmenden, insbesondere Fahrzeugen, bekannt ist und können auf aktive Weise angeschlossene Services nutzen, wie zum Beispiel einen Kollisionswarndienst auf dem Smartphone.

Statistische Aggregationen der Nutzerbewegungen können von der öffentlichen Verwaltung zur Entscheidungsfindung genutzt werden. Beispielsweise kann die Verkehrsleitzentrale Störungen in der Echtzeit-Verkehrsdichte erkennen und geeignete Schaltprogramme der Lichtsignalanlagen auswählen, um den Verkehr um die Störung herum zu führen. Die Schaltprogramme wurden zuvor von Verkehrsingenieuren gestaltet, die detaillierte Kenntnisse über die typischen Verkehrsströme durch einen Kreuzungsbereich besitzen, unterstützt durch Simulationen, die mit realistischen historischen Daten der UDM gefüttert wurden. In der Straßenplanung werden die historischen Verkehrsströme genutzt, um Umbaumaßnahmen passgenau zu gestalten und zu priorisieren. Die Häufung von Kollisionswarnungen – als Indiz für Beinaheunfälle – wird dabei ebenfalls zu Grunde gelegt. In die Priorisierung wird außerdem das permanente und flächendeckende Monitoring des Straßen- und Radwegzustands einbezogen, das die mit Sensorik

ausgestatteten Fahrzeuge, Fahrräder und Scooter liefern. Ebenso ist es denkbar, unter anderem Luftqualität, Lärmpegel und Ausleuchtung des Straßenraums permanent, flächendeckend und engmaschig zu erfassen und zur Entscheidungsfindung heranzuziehen.

Darüber hinaus kann die mobile Sensorik genutzt werden, um die Verwaltung gezielt bei der Bearbeitung von Aufgaben zu unterstützen. Kamerabilder können angefragt werden und liefern beispielsweise einen ersten Eindruck über den Zustand von Verkehrsschildern, die Infrastruktur oder die Lage vor Ort. An anderer Stelle können die Informationen zum tatsächlichen Verlauf von Baustellen genutzt werden, um die Baustellenkoordinierung zu unterstützen und zu vereinfachen.

Auch Bereiche der Verwaltung, die nicht zum Mobilitätssektor gehören, können profitieren. So kann zum Beispiel entsprechend trainierte Objekterkennung bei der Pflege des Baumkatasters helfen. Aggregierte LiDAR-Punktwolken erstrecken sich bis zu den Gebäudekanten und können unter anderem von den Versorgungsunternehmen zur Planung von Baumaßnahmen herangezogen werden.

Die UDM ist das Bindeglied zwischen vernetzten Fahrzeugen und der digitalisierten Verwaltung und in dieser Funktion eine tragende Komponente des digitalen Zwillings der Stadt.

### **3. Anforderungsanalyse**

In den frühen Projektphasen wurde in Form von projektinternen Workshops sowie durch Gespräche mit externen Stakeholdern eine Anforderungsanalyse durchgeführt. Die Experteninterviews lieferten dabei wichtige Erkenntnisse zu den Herausforderungen und Anforderungen bei der Implementierung einer UDM. Eine Auflistung der identifizierten Anforderungen ist im Anhang A zu finden. Die zugehörige Analyse ist bei Bedarf separat erhältlich. Die wesentlichen Ergebnisse werden hier zusammengefasst und gegebenenfalls aktualisiert, insofern im weiteren Projektverlauf neuere Erkenntnisse hinzugekommen sind. Einige der Anforderungen wurden in Kapitel 8 zu Handlungsempfehlungen erweitert, wie beispielsweise die Verlässlichkeit der Daten (8.3), die Harmonisierung ihrer Bereitstellung (8.2) und das Beachten von Datenschutzprinzipien (8.9).

In den Gesprächen wurde schnell klar, dass konkrete und quantifizierbare Anforderungen momentan in den wenigsten Fällen formuliert werden können. Das Interesse an qualitativ hochwertigen Daten ist vielerorts groß, wie diese genau auszusehen haben ist allerdings selten wohl definiert. Vorhandene Lösungen und Systeme bauen auf bereits existierenden Daten auf oder orientieren sich an etablierten Prozessen zur Datenerhebung. Die Wahrnehmung von Verbesserungsmöglichkeiten ist meist vorhanden, würde aber häufig neu zu entwickelnde Prozesse nach sich ziehen. Zusammenfassend kann gefolgert werden, dass sich quantifizierbare Anforderungen nur durch die Umsetzung konkreter Use Cases herausarbeiten lassen. Im weiteren Projektverlauf wurde sich entsprechend darauf konzentriert. Viele der gesammelten Anforderungen stammen daher aus der Umsetzung der in EDDY untersuchten Use Cases, die im Abschnitt 5 detailliert betrachtet werden. Konkrete technische Anforderungen werden daher eben dort behandelt. Hier werden übergeordnete Anforderungen an das Gesamtsystem UDM präsentiert.

In den Stakeholder-Interviews wurde das große Potential einer UDM zur Verbesserung der städtischen Lebensqualität erkannt und gleichzeitig als große Herausforderung eingestuft. Aus Nutzendensicht stellt sich insbesondere die Frage der Zukunftssicherheit der verwendeten Hard-

und Software. Für Hersteller- und Dienstleister sind Investitionen in die Implementierung nur gerechtfertigt, wenn ein System Bestand hat.

Das große Potential der UDM, das in Abschnitt 2 skizziert wurde, kann nur realisiert werden, wenn sie Use-Case-offen gestaltet wird. Da viele der möglichen Use Cases noch nicht konkretisiert oder sogar noch unbekannt sind, folgt daraus die Notwendigkeit einer flexiblen Architektur und eines offenen Datenmodells. Um Entwicklungen von Use Cases auch durch Dritte zu ermöglichen, sollten die architektonischen Schnittstellen nach Möglichkeit standardisiert, lizenzfrei und gut dokumentiert sein. Um eine große Nutzerzahl diverser Nutzergruppen erreichen zu können, sollte die Kommunikation mit den Schnittstellen mit möglichst weit verbreiteter Kommunikationstechnologie möglich sein.

Mit neuen Use Cases ergeben sich neue Anforderungen, die eine mögliche Skalierbarkeit des Systems – insbesondere auch hinsichtlich der Nutzerzahl – erfordern. Damit verbunden müssen effektive Wege zur Verarbeitung und gegebenenfalls Analyse von großen Datenmengen gefunden werden.

Die Daten müssen sicher und gegen Manipulationen geschützt ausgetauscht werden können. Für einige Use Cases können nutzergruppenspezifische Zugriffsrechte erforderlich sein. Auf Datenabnehmerseite muss es die Möglichkeit geben, nach relevanten Daten filtern zu können. Des Weiteren kann eine nutzerspezifische Datenaufbereitung erforderlich sein, dies kann allerdings Aufgabe von an die UDM angeschlossenen Drittanwendungen sein, was durch standardisierte Schnittstellen für den Datenzugriff begünstigt wird.

Für sicherheitskritische Funktionen sind verlässliche Daten essentiell (siehe Abschnitt 8.3). In jedem Fall sollten die Daten aber eine hohe Qualität aufweisen, was Mechanismen zur Qualitätskontrolle und -Sicherung erforderlich macht. Dazu gehört auch die Sicherstellung eines möglichst durchgängigen Betriebs, was unter anderem mit redundanten Komponenten und parallelen Prozessen erreicht werden kann.

## 4. HD-Karten

HD-Karten (HD steht für „High Definition“ bzw. „hohe Auflösung“) sind ein zentrales Element für autonome Fahrzeuge, da sie hochpräzise und detaillierte Informationen über das Straßennetz bereitstellen. Sie dienen der sicheren und effizienten Navigation, indem sie neben der Fahrbahnstruktur auch Verkehrsregeln, Objekte und Landmarken erfassen. Während der Antragsphase und auch noch zu Beginn des Projektes wurden die Begriffe HD-Karte und Urban Dynamic Map synonym verwendet, der Idee folgend, dass das modellierte hochaufgelöste, fahrstreifengenaue Straßennetzwerk um zusätzliche statische und dynamische Geodaten erweitert wird. Wie bereits in der Einleitung angedeutet und im folgenden Kapitel 5 noch weiter ausgeführt hat sich im Projektverlauf gezeigt, dass die Anforderung an die Geodaten zu unterschiedlich sind, als dass sie sich in ein homogenes Datenmodell fassen lassen würden. Bei der Entwicklung des Datenmodells und der Architektur zeigte sich dann auch, dass für eine explizite Verknüpfung des Straßennetzwerks mit den zusätzlichen Geoelementen keine Notwendigkeit bestand, die Geoposition reicht zur Verknüpfung aus. In diesem Bericht wird unter HD-Karte also lediglich das hochaufgelöste, fahrstreifengenaue Straßennetzwerk verstanden, das mit den zusätzlichen Komponenten aus

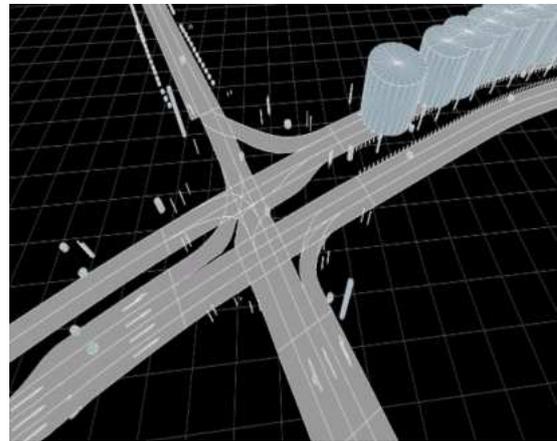
Kapitel 5 die UDM bildet. Je nach Anwendungsfall können Karte und Komponenten modular benutzt werden. Die Erstellung des hochgenauen Fahrstreifennetzwerks entlang der TAVF wird in diesem Abschnitt dokumentiert. Zur Digitalisierung war ein erheblicher Aufwand an manueller Arbeit erforderlich. Es wird angestrebt, die Prozesse in Zukunft weiter zu automatisieren. Die erzeugten Vektordaten stehen über die UDP für alle interessierten Akteure zur Verfügung und können unter folgendem Link abgerufen werden: [Fahrstreifengenaue Datensatz der TAVF - MetaVer](#).

#### 4.1. Digitalisierung der TAVF

Im Projekt wurde eine innovative Methode zur Erfassung des Straßennetzes eingesetzt, um die TAVF in Hamburg zu digitalisieren. Durch den Einsatz von Drohnen (UAVs) konnten Teile der TAVF präzise und detailliert vermessen werden. Die gewonnenen Daten ermöglichten eine fahrstreifengenaue Erfassung der Strecke.



(a) Digitalisierte Kreuzung im GIS



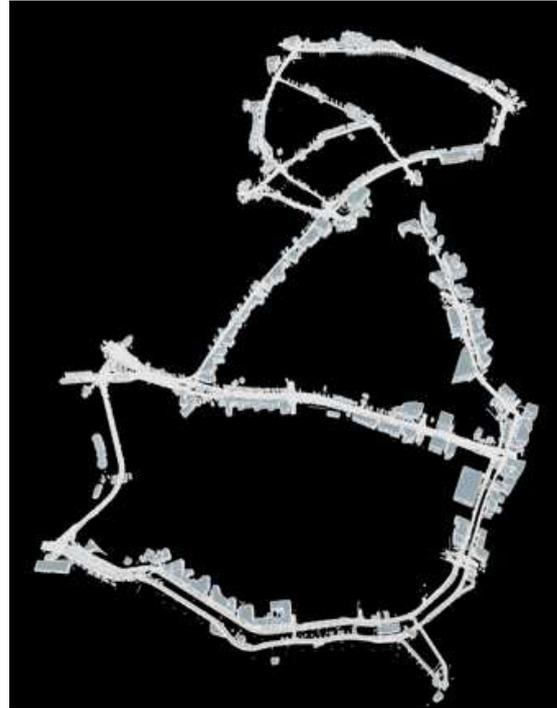
(b) Digitalisierte Kreuzung im 3D-Viewer

Abbildung 2: Vergleich der digitalisierten Kreuzung im GIS und im 3D-Viewer

Die UAV-Daten wurden zunächst in einem Geoinformationssystem (GIS) als Vektordaten digitalisiert und anschließend mithilfe eines Konverters in das branchenübliche HD-Kartenformat OpenDRIVE überführt. Dieses hochgenaue Format bildet die Grundlage für die Entwicklung und Simulation automatisierter Fahrfunktionen. Anschließend wurden die erzeugten Daten in eine dreidimensionale Visualisierung integriert, die durch zusätzliche städtische Objekte wie Straßenbäume, Verkehrsschilder, Gebäude (Level of Detail 1 [LoD1]) und Straßeninventar eine hohe Realitätsnähe erreichte. Dafür wurde der Online-Viewer [OpenDRIVE Viewer](#) verwendet. Auf derselben Programmibibliothek dieses OpenDRIVE-Viewers basiert auch der [OpenDRIVE-Treiber für GDAL](#), welcher es ermöglicht, OpenDRIVE-XML-Daten in übliche GIS-Formate zu konvertieren und somit ebenfalls in Bezug zu amtlichen Geodaten zu setzen [2, 3].



(a) Gesamtübersicht: TAVF im GIS



(b) Gesamtübersicht: TAVF im 3D-Viewer

Abbildung 3: Vergleich der Gesamtübersichten von TAVF im GIS und im 3D-Viewer

Die Umsetzung des Projekts hat gezeigt, dass die Digitalisierung städtischer Infrastrukturen mithilfe von Drohnen ein vielversprechender Ansatz ist. Dennoch sind noch einige Herausforderungen zu bewältigen. So ist der derzeitige Prozess der Datenverarbeitung noch stark von manueller Arbeit geprägt und daher zeitaufwendig. Zudem erfolgt die Digitalisierung kommunaler Daten meist in einem GIS, in dem mit LineStrings gearbeitet wird, also mit Punktfolgen als diskrete Geometrien. Dieser Umstand führt zu Problemen bei der OpenDRIVE-Generierung. Näheres dazu wird im Kapitel 4.2 erläutert. Derzeit kann eine Stadt keine Gewähr für die Richtigkeit der Daten übernehmen. Die Daten unterliegen einem schnellen Wandel, und die Kapazitäten der Kommunen sind begrenzt. Die Verantwortung für die Überprüfung bleibt daher bei den Nutzern. Ob ein fahrstreifengenaue, stadtweiter Datensatz aufgebaut werden soll, ist bislang noch nicht entschieden. Diese Entscheidung wird erst getroffen, wenn ein konkreter Bedarf von Nutzern besteht. Auch dann muss geprüft werden, mit welchem Aufwand dies innerhalb der Stadt umgesetzt werden kann.

## 4.2. Entwicklung eines eigenen Konverters für OpenDRIVE

Die TAVF in Hamburg wurde ursprünglich mit einem von TrianGraphics Trian3DBuilder vorgegebenen Schema digitalisiert, das in das OpenDRIVE-Format konvertiert werden konnte. Der Trian3DBuilder wurde bereits im HEAT-Projekt erfolgreich eingesetzt und diente daher als Grundlage für die Weiterarbeit. Allerdings traten bei dieser Vorgehensweise einige Herausforderungen auf:

- Geometrische Mikrolücken: Kleine Rundungsfehler führten zu Lücken in den Geometrien.

- Inkonsistente ID-Vergabe: Bei jeder Generierung wurden neue IDs zugewiesen, was eine konsistente Datenverwaltung erschwerte.
- Nicht quelloffen: Einschränkung durch proprietäre Software.
- Hohe Kosten: Lizenzgebühren erhöhten den finanziellen Aufwand.

Um diese Herausforderungen zu bewältigen, entstand die Idee, einen eigenen Konverter zu entwickeln, der OpenDRIVE-Dateien aus GIS-Daten erstellen kann. Die zentrale Strategie besteht darin, Vektordaten zunächst in QGIS aufzubereiten und sie anschließend mit einem maßgeschneiderten Python-Tool in das OpenDRIVE-Format zu überführen. Der im Abschnitt 4.1 erwähnte OpenDRIVE-Treiber für GDAL unterstützt nur das einseitige Konvertieren *von* OpenDRIVE-Dateien in andere Formate, nicht das Exportieren *nach* OpenDRIVE. Grundlage der Entwicklung des eigenen Konverters bildet primär die Spezifikation von [ASAM OpenDRIVE 1.8.0](#). Der Konverter erzeugt OpenDRIVE-Dateien im Format 1.8 und weist große Parallelen zum vom DLR entwickelten Road2Simulation-Leitfaden [4] auf, der eine standardisierte Erhebung und Konvertierung von Straßen- und Oberflächendaten in OpenDRIVE beschreibt. Als Machbarkeitsnachweis wurde eine spezielle Kreuzung der TAVF aufbereitet, sodass eine 3D-Simulation in Vissim von PTV erfolgreich durchgeführt werden konnte. Für die Nutzung des entwickelten Konverters zur Umwandlung von GIS-Daten in OpenDRIVE müssen die Vektordaten in zwei speziell vorbereiteten GeoPackages vorliegen, die folgende Informationen enthalten (optional ein drittes GeoPackage für Signale und Objekte):

Tabelle 1: Attributtabelle der Roads

Feld	Datentyp	Beschreibung
<b>RoadID</b>	int(32)	Eindeutige ID der Straße
<b>Predecessor</b>	int(32)	Vorgänger der Straße
<b>Successor</b>	int(32)	Nachfolger der Straße
<b>JunctionID</b>	int(32)	Kreuzungs-ID (-1 bei keiner Kreuzung)
<b>RoadMark (optional)</b>	string	Art der Straßenmarkierung
<b>StreetName (optional)</b>	string	Name der Straße
<b>Length (berechnet)</b>	float	Länge der Straße

Tabelle 2: Attributtabelle der Lanes

Feld	Datentyp	Beschreibung
<b>RoadID</b>	int(32)	ID der zugehörigen Straße
<b>LaneID</b>	int(32)	ID der Fahrspur
<b>LaneType</b>	string	Typ der Fahrspur
<b>JunctionID</b>	int(32)	Kreuzungs-ID (-1 bei keiner Kreuzung)
<b>RoadMark (optional)</b>	string	Fahrspurmarkierung
<b>Speed (optional)</b>	int(32)	Geschwindigkeitsbegrenzung

Feld	Datentyp	Beschreibung
Surface (optional)	string	Material der Fahrbahn
Access (optional)	string	Zugangsbeschränkung
Predecessor (berechnet)	int(32)	Vorgänger der Spur
Successor (berechnet)	int(32)	Nachfolger der Spur
NumberOfLanesLeft (berechnet)	int(32)	Anzahl Spuren links
NumberOfLanesRight (berechnet)	int(32)	Anzahl Spuren rechts
width_start (berechnet)	float	Spurbreite am Anfang
width_end (berechnet)	float	Spurbreite am Ende

Tabelle 3: Attributtabelle der Objekte und Signale

Feld	Datentyp	Beschreibung
RoadID	int(32)	ID der zugehörigen Straße
LaneID	int(32)	ID der Fahrspur
Is_Object	boolean	Objektkennung (Ja/Nein)
Is_Signal	boolean	Signalkennung (Ja/Nein)
Type	string	Typ des Signals/Objekts
SubType	string	Subtyp des Signals/Objekts
Name	string	Bezeichnung des Signals/Objekts

### Einschränkungen der aktuellen Version

- Einfache Geometrie: Nur Geraden (LineStrings) werden unterstützt.
- Spurbreiten: Lineare Berechnung zwischen Anfangs- und Endpunkt der Spur.
- Kurvenproblematik: Diskrepanz zwischen Straßenreferenzlinie und Spurdarstellung bei Kurven.
- Keine Höhendaten: Höheninformationen werden nicht berücksichtigt.

Mit dem eigenen Konverter wird eine flexiblere, kosteneffiziente und anpassbare Lösung für die OpenDRIVE-Konvertierung der TAVF in Hamburg geschaffen. Zukünftige Weiterentwicklungen zielen darauf ab, bestehende Einschränkungen zu überwinden und die Genauigkeit sowie Funktionalität zu verbessern.

## 5. Von Use-Case-Beschreibungen zur Systemarchitektur

Das hochaufgelöste Straßennetz aus Abschnitt 4 ist die Grundlage, die zusammen mit weiteren Geodaten zum Straßenraum die UDM bildet. Abbildung 4 zeigt, für welche Geodaten eine Erfassung und Bereitstellung über die UDM realisiert wurde. Die zur Klassifizierung genutzten Layer

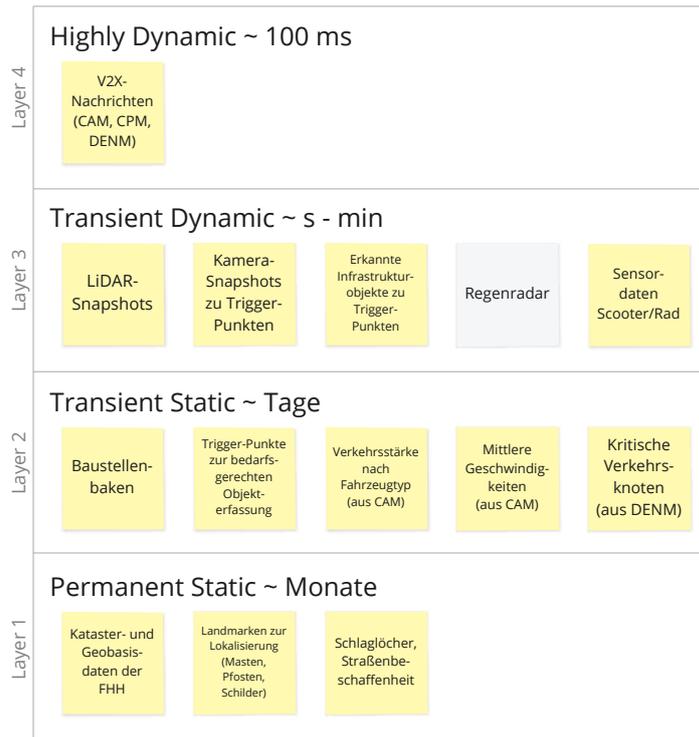


Abbildung 4: In der UDM verarbeitbare Geodaten, klassifiziert anhand ihrer Dynamik in Anlehnung an die LDM-Layer 1-4. Die Zwischenspeicherung von Regenradardaten des DWD ist konzeptionell umgesetzt.

wurden dem Konzept der Local Dynamic Map [1] entnommen. Über die iterative Erarbeitung von User Stories wurden diese Datenthemen als relevant für die UDM identifiziert. Die User Stories sind in Anhang B einzeln beschrieben und lassen sich zu thematischen *Use Cases* zusammenfassen, welche im Folgenden vorgestellt werden. Anhand der Beschreibung der einzelnen Use Cases wird schrittweise die Systemarchitektur der UDM erläutert.

Die UDM ist nicht nur eine zentrale Datenplattform, sie erfüllt auch unterschiedliche Funktionen zum Empfang, der Verarbeitung und der Bereitstellung von Daten verschiedener Verkehrsteilnehmer. Abbildung 5 zeigt die fünf erarbeiteten Kernkomponenten der UDM. Jeder Use Case lässt sich über einen oder mehrere Datenverarbeitungspfade durch diese Komponentenlandschaft abbilden. Jede Komponente dieser Systemarchitektur ist charakterisiert durch ihr eigenes Datenmodell zur Speicherung und Verarbeitung von Daten und eine oder mehrere Schnittstellen für den Datenempfang oder die Datenbereitstellung. Aufgrund der Heterogenität der Datenthemen wurde ein modulares System entworfen, welches die unterschiedlichen Datencharakteristiken möglichst effizient abzubilden versucht. Die in Abbildung 4 aufgeführten Daten unterscheiden sich beispielsweise durch

- *Update-Frequenz*: Für hoch frequentierte Daten eignen sich primär Übertragungsschnittstellen, die auf einem Publish-Subscriber-Prinzip basieren. Klassische HTTP-Kommunikation im Gegensatz hat einen Overhead, der die Latenz bei der Datenübertragung negativ beeinflusst.

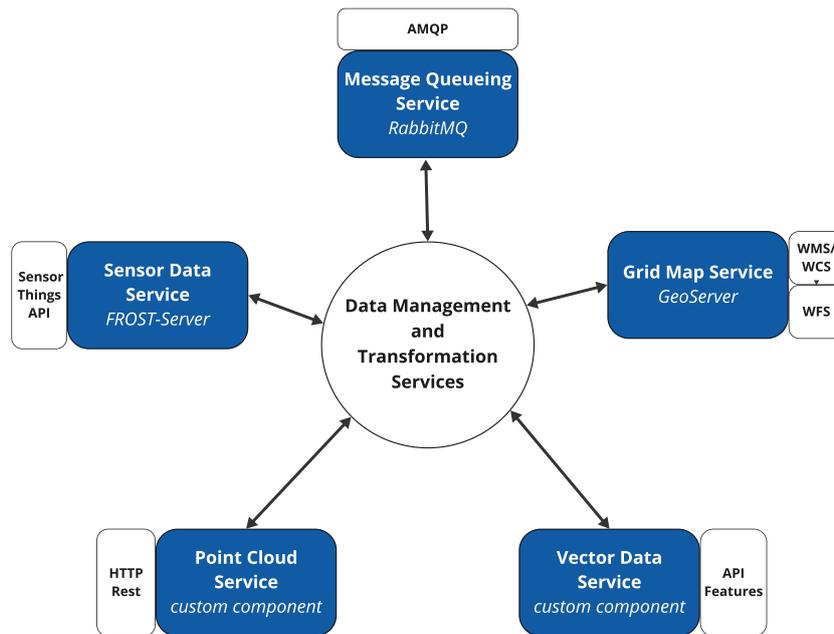


Abbildung 5: Die Kernkomponenten der UDM als Datenverarbeitungs- und Datenbereitstellungsplattform mit ihren Schnittstellen nach außen

- *Datensatzgröße*: Umfassende Punktwolkendaten lassen sich effizienter im Binär-Format als im Text-Format übertragen. Für einzelne Sensormessungen reicht hingegen ein in JavaScript Object Notation (JSON) verpackter Messwert, der serverseitig einfacher interpretiert werden kann.
- *Modellierbarkeit*: Diskrete Vektordaten wie Fahrstreifengrenzen oder Schildpositionen bedürfen anderer Speicherformate und Übertragungswege als Phänomene wie Lärmbelastung oder Luftverschmutzung, die als kontinuierliche Raster modelliert werden können.
- *Verarbeitungsgrad*: Rohdaten wie einzelne Sensormesswerte oder Positionen erkannter Objekte können andere Eigenschaften aufweisen als daraus abgeleitete und aggregierte oder untereinander verschnittene Geodaten.

Es existiert kein monolithisches Einheitssystem, welches all diese Eigenschaften mit lediglich einem Datenmodell und einer Übertragungsschnittstelle abdecken kann. Ein solches System würde zu viele Einschränkungen aufweisen und wäre sehr aufwändig in der Implementierung, da nicht auf bereits bestehende Standards und Schnittstellen zurückgegriffen werden könnte, was wiederum auch die Entwicklung proprietärer Nutzeranwendungen notwendig machen würde.

Für die UDM werden nach Möglichkeit standardisierte Datenmodelle und Schnittstellen verwendet, um größtmögliche Kompatibilität und Flexibilität zur Integration heterogener Daten auch in Zukunft zu gewährleisten. Dabei wird vor allem auf Standards des Open Geospatial Consortium (OGC) zurückgegriffen, welches offene Formate und Übertragungsschnittstellen von Geodaten spezifiziert.

Die UDM speichert intern Geodaten im geodätischen Koordinatenreferenzsystem WGS 84, siehe Architekturentscheidung 005. Sendende oder empfangene Nutzer müssen daher eventuell

notwendige Koordinatensystemtransformationen auf Anwendungsseite sicherstellen.

## 5.1. Use Case: Verbesserte Fahrzeug-Lokalisierung

Umfangreiche Testmessungen auf der TAVF in Hamburg haben gezeigt, dass der GNSS-Empfang in vielen Bereichen nicht ausreichend ist, wie Abbildung 6 veranschaulicht. Der durch Häuser und andere Objekte eingeschränkte Zugang zum Himmel schränkt die Anzahl an nutzbaren Satelliten und damit die erreichbare Genauigkeit stark ein. Zudem erhöht sich auch die Wahrscheinlichkeit für Multipath-Effekte, bei denen die ermittelte Position systematisch um bis zu typisch 50 m abweicht, ohne dass das System diesen Fehler selbst erkennt. Ein autonomes Fahrzeug muss jedoch zu jeder Zeit und unter allen Betriebsbedingungen, wie z. B. einem Neustart ohne Vorinformationen („Cold-Start“), seine eigene Position mit hoher Zuverlässigkeit und Genauigkeit kennen. Weiterhin bildet die Positionsbestimmung eine entscheidende Basis für alle Positionsbasierten Dienste, wie z. B. die Straßenzustandserfassung mit Fahrrädern. Im Rahmen des Projektes EDDY wurden zwei Varianten für eine verbesserte Lokalisierung durch Nutzung von LiDAR-Punktwolken (Abschnitt 5.1.1) und durch Nutzung von Landmarken (Abschnitt 5.1.2) implementiert.

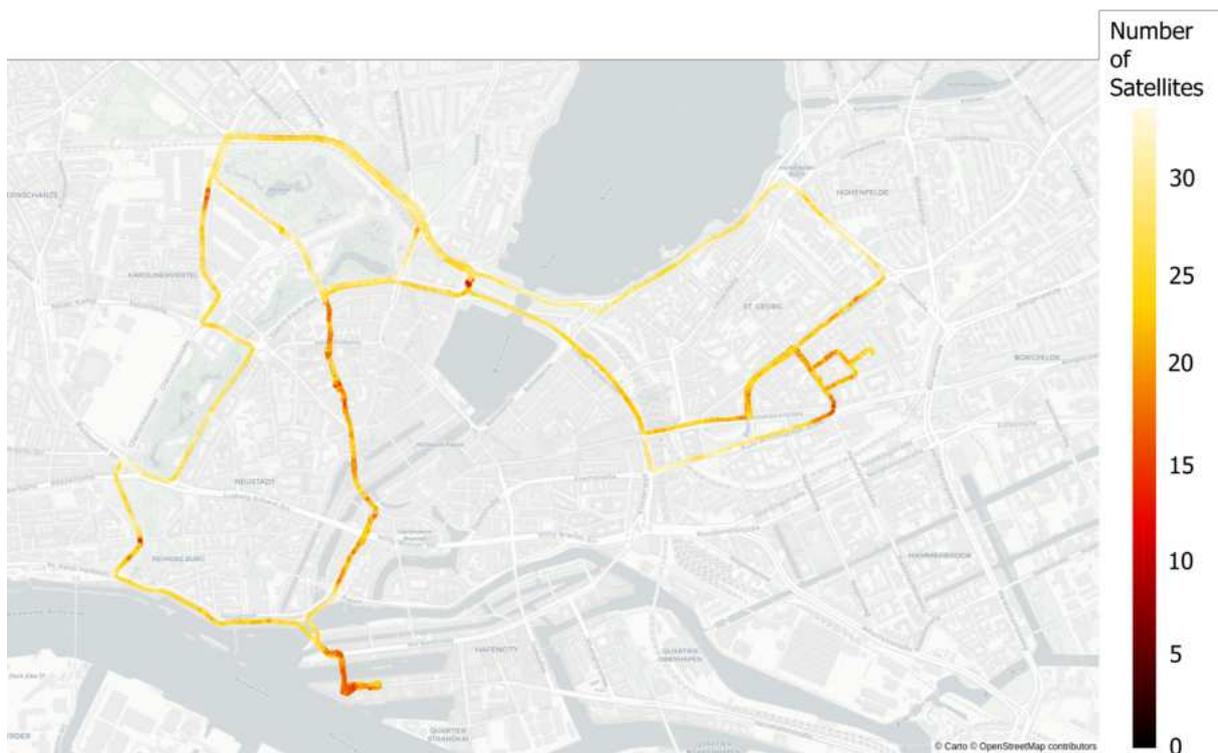


Abbildung 6: Bei Befahrung gemessene GNSS-Abdeckung auf der TAVF

### 5.1.1. Lokalisierung mittels LiDAR-Punktwolken

Bei der Lokalisierung mit LiDAR-Punktwolken wurden SLAM-Verfahren (Simultaneous Localization And Mapping) auf verteilte Systeme portiert. Bei der vom DLR entwickelten UDM-basierten Version erfolgt die Erstellung der Karte zur Registrierung der LiDAR-Daten ser-

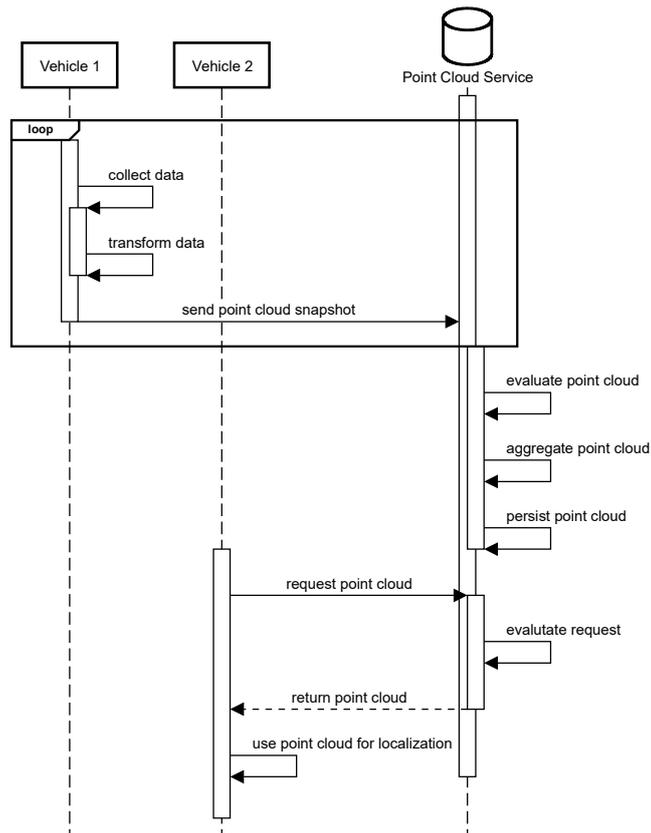


Abbildung 7: Sequenzdiagramm zur Fahrzeuglokalisierung mittels LiDAR-Punktwolken

verseitig, und mehrere Fahrzeuge können Daten beisteuern. Abbildung 7 veranschaulicht, wie ein Fahrzeug Daten mit seiner LiDAR-Onboard-Sensorik kartiert und als räumlich begrenzten „Snapshot“ zum EDDY-Server sendet (UDM). Dort werden die ankommenden Daten zu einer Gesamt-Punktwolke zusammengefügt und in einer Datenbank persistiert. Relevante Ausschnitte der so erstellen Karte können anschließend von einem weiteren Fahrzeug zur Lokalisierung heruntergeladen werden. Auf diese Weise ergeben sich mehrere Vorteile: durch die Aggregation mehrerer Messfahrten wird das statistische Positionsrauschen der Eingabedaten reduziert, es können große Gebiete vermessen und für andere Nutzer zur Verfügung gestellt werden, und die serverseitige Kartierung benötigt keine Initialisierung in neuen Fahrtregionen und keine Rechenleistung auf Seiten des so navigierenden Fahrzeugs. Bei entsprechend guter geodätischer Genauigkeit und Vollständigkeit der Karte wird so eine Positionsqualität höher als mit GNSS erreicht. Ein Beispiel ist in Abbildung 8 dargestellt. Details zum Verfahren wurden unter [5] publiziert. Um parallele Rechenschritte möglichst effizient durchzuführen, wurde in [6] eine Methode zum atomaren Zugriff auf *Shared Pointers* vorgestellt, wodurch in einigen Fällen z. B. auf Mutexes verzichtet werden kann. Dies hat insbesondere Vorteile bei kleinteiligen Prozessschritten und hohem Parallelisierungsgrad der Anwendung, wie den hier verwendeten Geo-Datenbanken zur Verarbeitung von LiDAR-Punktwolken mit sehr vielen Elementen.

Das hier verwendete LiDAR-Kartierungs- und -Positionierungsverfahren kann als datenschutzfreundlich angesehen werden, da hier nur die Entfernungsdaten der LiDAR-Messungen verwendet werden, welche typischerweise keine wiedererkennbaren personenbezogenen Inhalte wie Gesich-

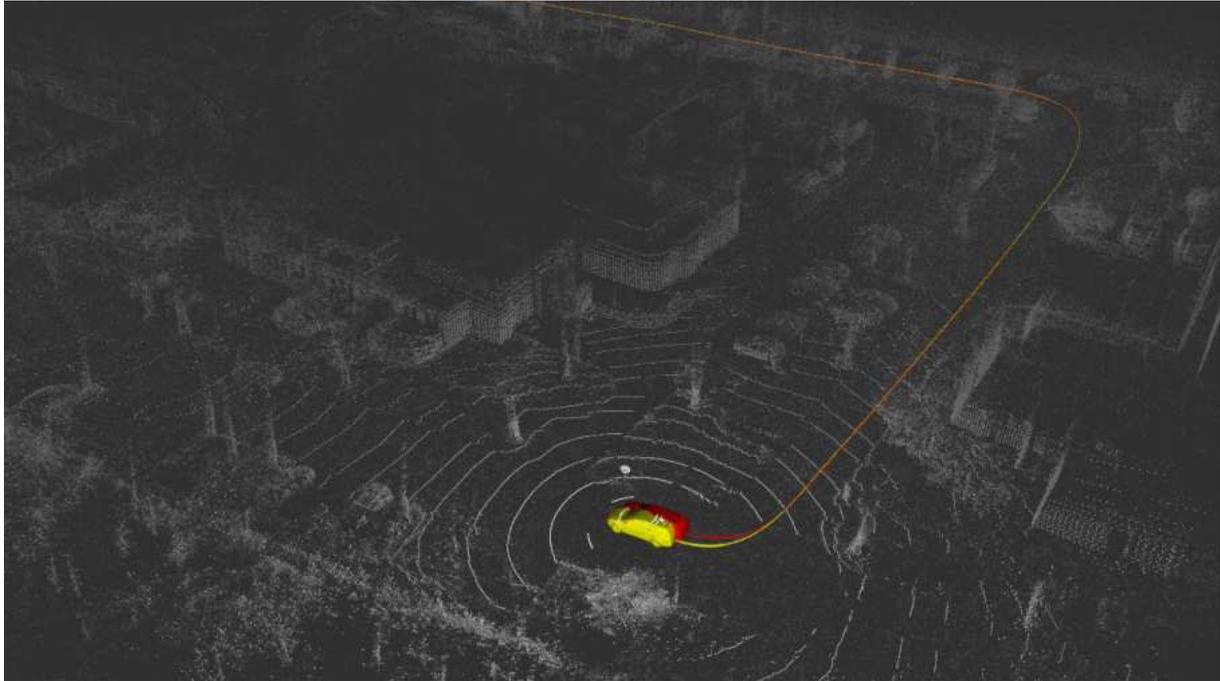


Abbildung 8: LiDAR-Lokalisierung (gelb) und GNSS-Lokalisierung (rot) im Live-System. Beide Positionierungsverfahren sind echtzeitfähig und im Versuchsfahrzeug für das automatisierte Fahren integriert.

ter oder Kfz-Kennzeichen enthalten. Für sinnvolle Erweiterungen, bspw. der Verwendung von LiDAR-Remissionswerten zur besseren Segmentierung von z. B. Fahrstreifenmarkierungen zur Lokalisierung, oder Bilddaten in Kombination zur semantischen Segmentierung der LiDAR-Punktwolke, sollten serverseitig nur die Segmentierungsergebnisse gespeichert werden, da sich hieraus typischerweise keine personenbezogenen Inhalte rekonstruieren lassen.

Abbildung 9 skizziert die Systemarchitektur zum Austausch von Punktwolkendaten über die Internet-Schnittstelle mit der UDM. Da momentan noch keine standardisierten Formate und Dienste für diese Architekturkomponente vorliegen, orientiert sich die Implementierung der Schnittstelle prototypisch am [Point-Cloud-Datenmodell](#) des Robot Operating System (ROS), siehe Architekturentscheidung 009. Ergänzende Details zum Datenmodell für Upload und Download der Punktwolkendaten sind in Anhang C.1 aufgeführt.

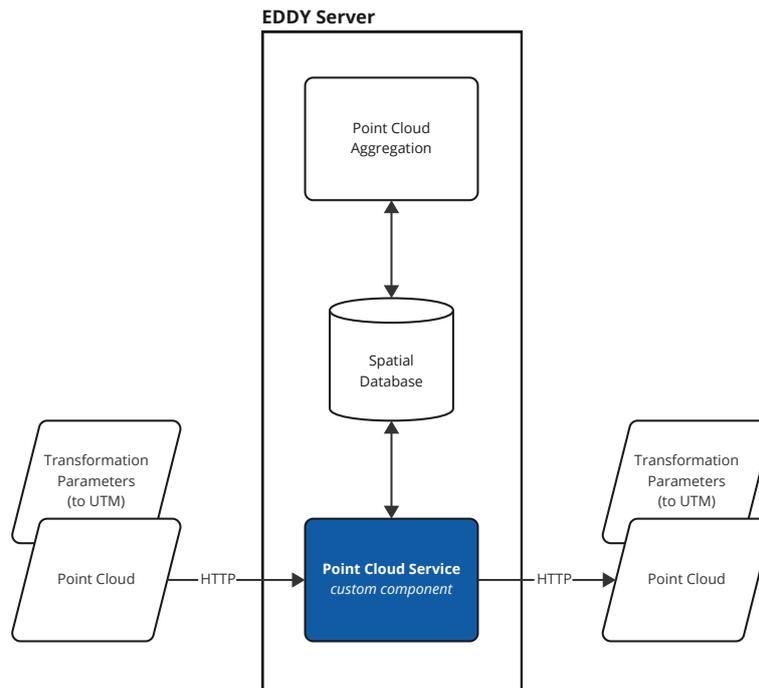


Abbildung 9: Architektur für LiDAR-Daten

### 5.1.2. Lokalisierung mittels Landmarken

Analog zur in Abschnitt 5.1.1 vorgestellten LiDAR-Positionierung wurde ein weiteres LDM-gestütztes Positionierungsverfahren implementiert. Durch die HAW Hamburg wurde im Projekt EDDY die Lokalisierung mittels Landmarken, wie z. B. Verkehrszeichen, entworfen, implementiert und getestet. Durch die Anwendung des Verfahrens auf standardisierte Objekte im Straßenraum mit definierter Geometrie, kann das Verfahren neben Objektart und Position auch den Abstand zum Fahrzeug berechnen und zur Lokalisierung nutzen.

Die Funktion ist in Abbildung 10 und der Ablauf in Abbildung 11 dargestellt. Basierend auf einer ersten Positionsschätzung werden die im Umfeld des Fahrzeugs erwarteten Objekte (ground truth) aus der UDM abgerufen und dem Fahrzeug bereitgestellt. Dies geschieht durch Abfragen der Geodaten über eine OGC-API-Features-Schnittstelle vom Vektordatendienst, der GIS-Daten bereitstellt, siehe Abbildung 12 und Architekturentscheidung 001. Ergänzende Details zum Datenmodell für das Abrufen von Verkehrsinfrastrukturobjekten sind in Anhang C.2 aufgeführt. Das Fahrzeug vergleicht die erkannten Objekte im Fahrzeugumfeld mit den erwarteten Objekten und ermittelt damit die eigene Position. Je nachdem, wie viele Objekte für die Lokalisierung nutzbar sind, variiert die Genauigkeit der Positionsbestimmung. Bei ein oder zwei Landmarken kann zwar die Distanz zu den Objekten ermittelt werden, jedoch ergeben sich noch mindestens zwei Richtungen mit der gleichen Distanz und somit zwei mögliche Positionen. In Kombination mit einer ungefähren Fahrtrichtung reicht dies jedoch bereits zur Bestimmung der Position. Ab drei Landmarken ist eine eindeutige Lokalisierung möglich. Simulationsergebnisse zu erreichbaren Genauigkeiten sind in den Abbildungen 13 und 14 dargestellt. Die Simulation zeigt, dass mit vier Landmarken eine Lokalisierungsgenauigkeit von unter 2,5 m in 90 Prozent

der Simulationsfälle möglich ist. Eine solche, statistische Betrachtung ist zur Abschätzung der Genauigkeit nach dem Stand der Technik üblich. Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden veröffentlicht in [7, 8].

Bei der Nutzung des Verfahrens werden Merkmale der erkannten Referenzobjekte im ersten Schritt aus den Kamerabildern extrahiert. Diese enthalten somit keinerlei personenbezogene Informationen. Alle weiteren Verarbeitungsschritte erfolgen mit diesen. Das Verfahren berücksichtigt damit den Datenschutz „per Design“.



Abbildung 10: Funktionsweise der Lokalisierung auf Basis von Landmarken

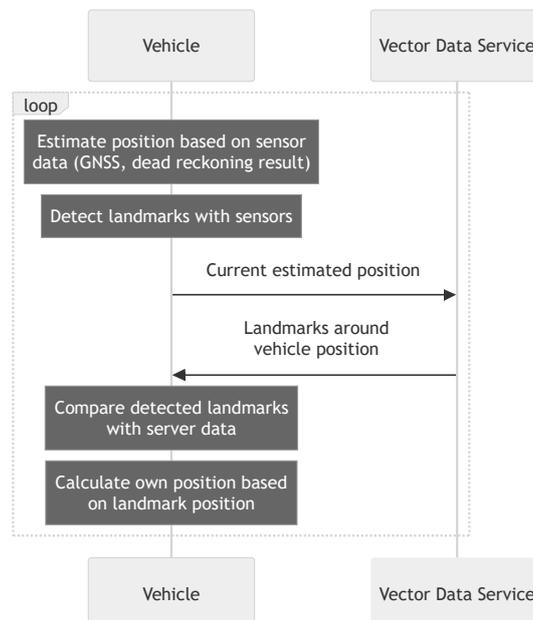


Abbildung 11: Ablauf der Lokalisierung auf Basis von Landmarken

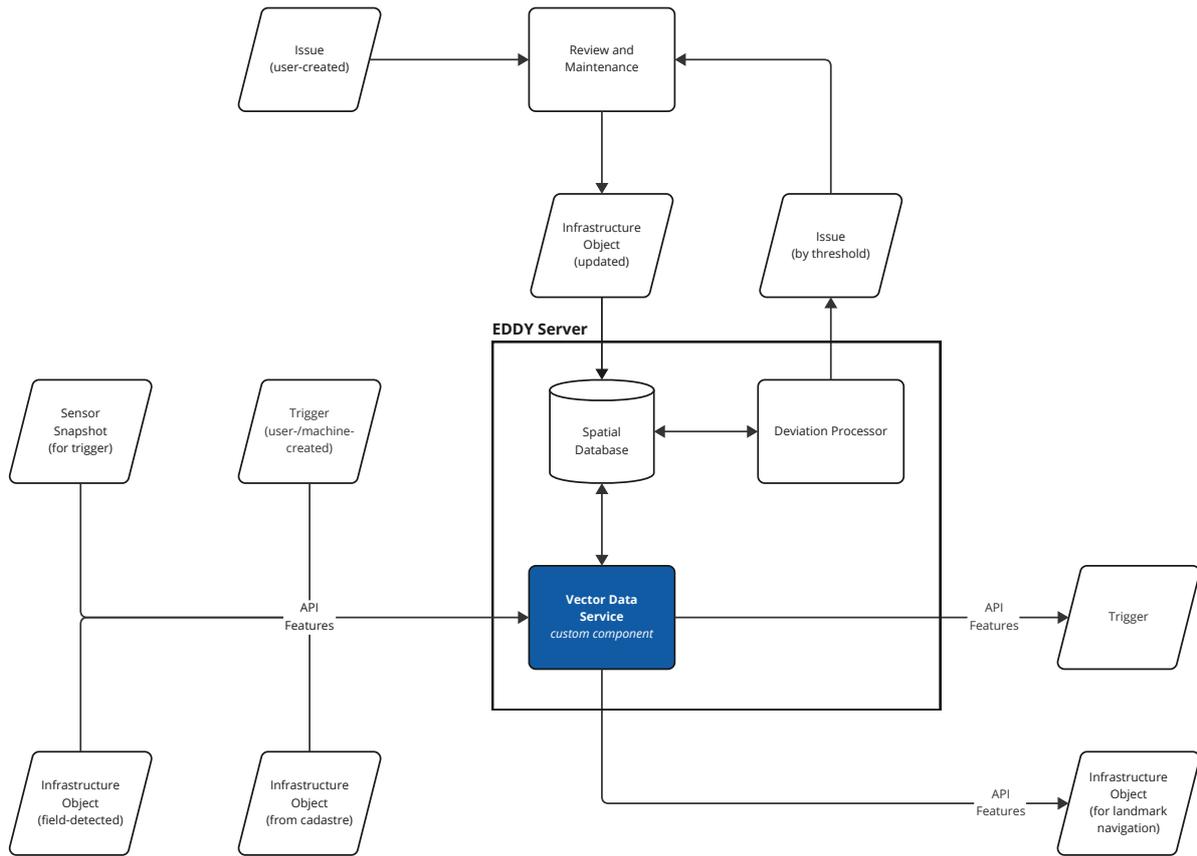


Abbildung 12: Architektur für Verkehrsinfrastrukturdaten (GIS-Daten)

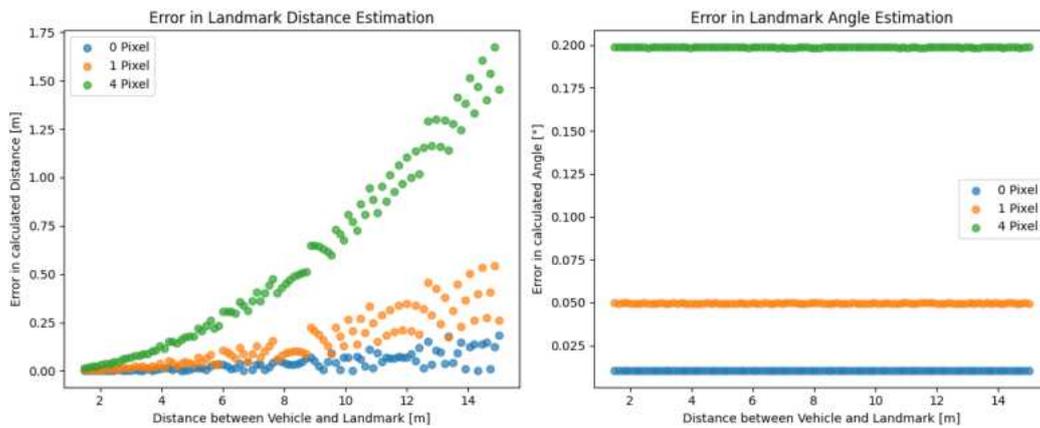


Abbildung 13: Durch Simulationen abgeschätzter Fehler in der Lokalisierung von Landmarken

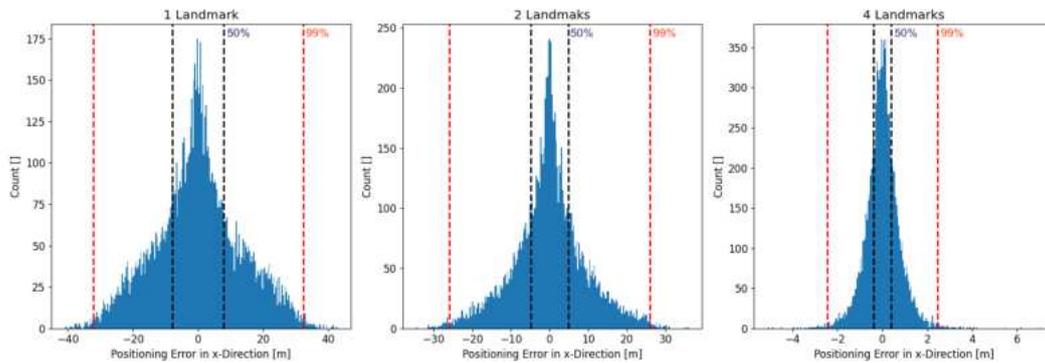


Abbildung 14: Histogramme zur Genauigkeit der Lokalisierung auf Basis von Landmarken

### 5.1.3. Bewertung der Ergebnisse der Lokalisierungsverfahren

Tabelle 4 fasst die Ergebnisse des Projektes EDDY im Vergleich zu einer Lokalisierung basierend auf GNSS zusammen. Beide prototypisch implementierten Verfahren erreichen unter idealen Bedingungen Genauigkeiten im Bereich von wenigen Zentimetern und sind damit vergleichbar mit Satelliten-gestützten Verfahren. Einen besonderen Nutzen können sie gerade in der Kombination entfalten: Während GNSS-basierte Lokalisierung besonders gut in freien, nicht überbauten Bereichen funktioniert, eignen sich diese nicht für die LiDAR- oder Landmarken-basierte Positionsbestimmung. Sind ausreichend viele bekannte Landmarken im Umfeld des Fahrzeugs vorhanden, so liefert dieses Verfahren bei minimaler Datendichte gute Ergebnisse. Sind zwar Bauwerke, aber keine Landmarken vorhanden, so kann die Fahrzeugposition mittels LiDAR-basierter Lokalisierung ermittelt werden. Durch die Kombination ergibt sich damit zum einen die Möglichkeit, die ermittelten Positionen zu überprüfen und z. B. GNSS-Spoofing zu erkennen. Zum anderen ermöglicht die Kombination potenziell eine deutliche Erweiterung der Operational Domain (OD) für ein autonomes Fahrzeug.

Tabelle 4: Gegenüberstellung der betrachteten Lokalisierungsverfahren

Methode	Abschätzung der Genauigkeit			Datendichte	Datenformat
	best case	typisch	worst case		
GNSS	0,016 m	1 m	bis zu 50 m (multipath)	-	(u.a. NMEA)
LiDAR	0,05 m	0,15 m	2 m (Kartenfehler)	hoch	Punktwolke
Landmarken	0,05 m	1 m	4,70 m (2 Marken, 50 %) 0,40 m (4 Marken, 50 %)	niedrig	OGC- Vektor-Geom.

## 5.2. Use Case: Erkennung und Lokalisierung von Verkehrsinfrastrukturobjekten

Kameras und LiDAR, wie sie in den vorherigen Abschnitten zur Orientierung und Lokalisierung im Raum verwendet wurden, stellen nach erfolgreicher Selbstlokalisierung relativ genaue mobile Sensorsysteme dar, die auch zur Erfassung von Daten im Straßenverkehrsraum genutzt werden können, deren Verwendung (auch) über die Selbstlokalisierung hinausgeht. In diesem Kapitel werden einige Anwendungsbeispiele vorgestellt, die auf der UDM-Architektur und ggf. auf Drittanwendungen aufbauen.

### 5.2.1. Erkennen und Lokalisieren von Baustellenbaken

Mit einer durchschnittlichen Fahrzeit von circa 25 min für 10 km Fahrtstrecke liegt das Stadtzentrum von Hamburg nach dem [TomTom-Traffic-Index](#) auf Platz 4 der Städte mit der höchsten Verkehrsverstopfung in Deutschland. Um durch aktuelle Informationen über den Ort und die Ausdehnung von Baustellen den Verkehrsfluss besser zu koordinieren, hat die Freie und Hansestadt Hamburg begonnen, Baustellenbaken mit integriertem GNSS und Mobilfunk zu testen (Projekt [GeoNetBake](#)). Im Zuge des Projektes EDDY wurde der bildbasierte Algorithmus zur Lokalisierung anhand von Landmarken (Abschnitt 5.1.2) erweitert, um bei bekannter und gültiger Fahrzeugposition Baustellenbaken relativ zum Fahrzeug in den Kameradaten erkennen und lokalisieren zu können. Durch die Zusammenführung mit der Fahrzeugposition kann hieraus die absolute geografische Position einer Baustellenbake ermittelt und in die UDM übertragen werden. Dieses Objekterkennungs- und Übertragungssystem wurde prototypisch auf dem Testfahrzeug der HAW Hamburg implementiert und in einer live-Demonstration am 16.11.2023 beim Projektpartner LSBG in Hamburg erfolgreich vorgeführt. Abbildung 15 zeigt den Ablauf zur Übertragung von erkannten Baustellenbaken an die UDM. Abbildung 16 zeigt das Web-Frontend des Systems, welches als eine Drittanwendung genau diese zuvor übermittelten Daten aus der UDM zur Darstellung abrufen.

Die Übertragung von erkannten Verkehrsinfrastrukturobjekten in die UDM geschieht durch Hochladen der Geodaten über OGC API Features an den Vektordatendienst, der GIS-Daten empfängt und bereitstellt (vgl. hierzu Abbildung 12 und Architekturentscheidung 001). Für das Hochladen von Vektordaten wurden Teile von Teil 4 *Create, Replace, Update and Delete* der [API-Features-Spezifikation](#) implementiert, welcher sich zum Zeitpunkt des Projekts noch im Entwurfsmodus (draft) befand. Aus diesem Grund lag noch keine quelloffene Referenzimplementierung vor, die anstatt der Eigenimplementierung hätte verwendet werden können.

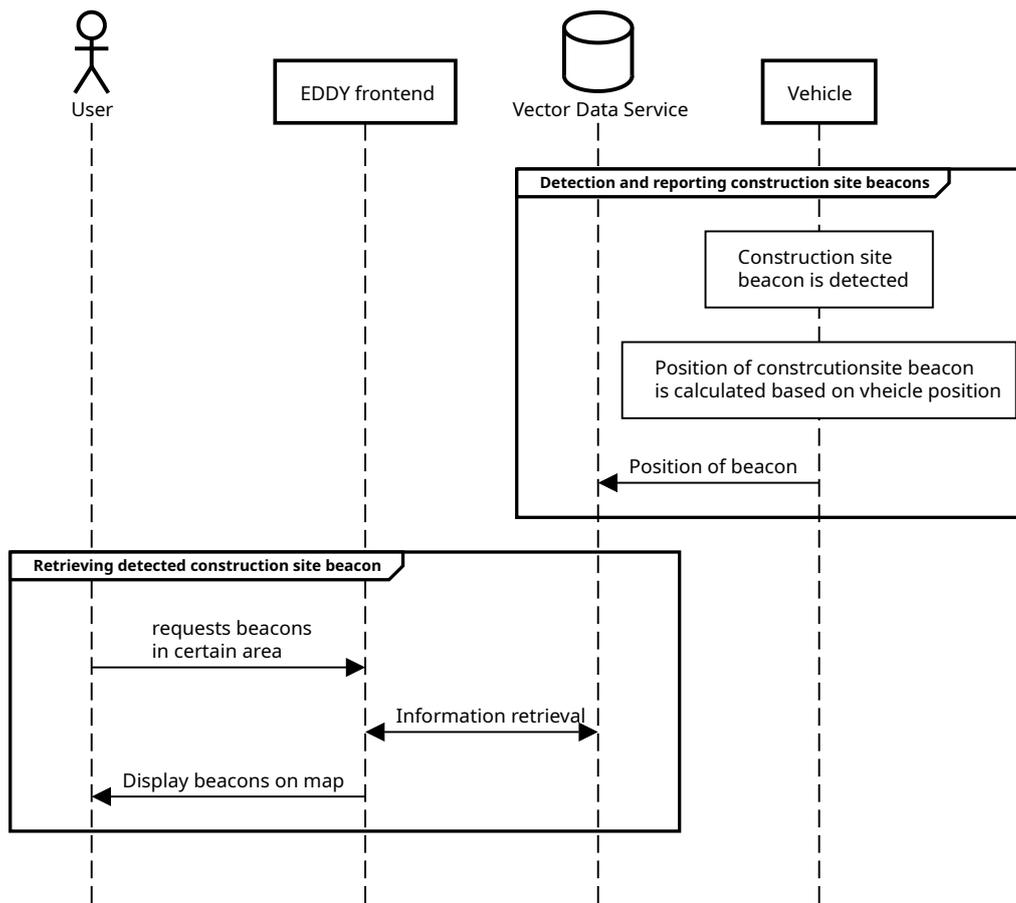


Abbildung 15: Ablauf der Erkennung von Baustellenbaken

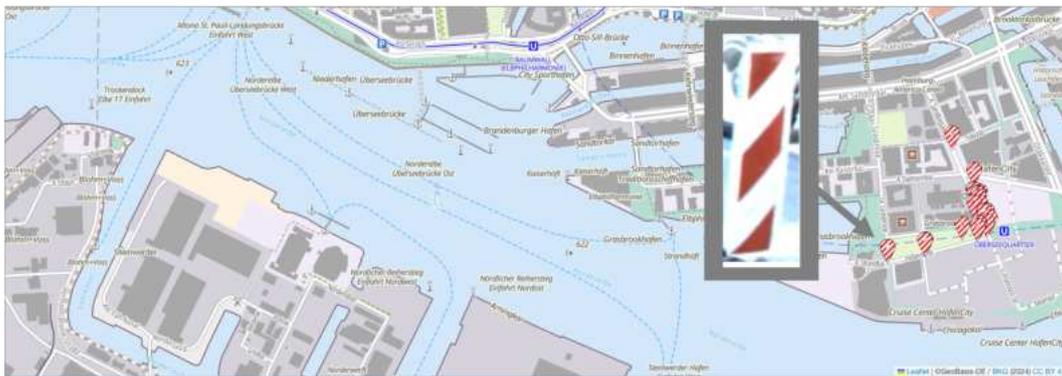


Abbildung 16: Web-Frontend mit Darstellung der lokalisierten Baustellenbaken

### 5.2.2. Automatische Änderungsdetektion an Verkehrsinfrastruktur

Analog zum kamerabasierten Ansatz wurde ebenfalls das Verfahren zur LiDAR-Lokalisierung anhand von Punktwolkendaten (Abschnitt 5.1.1) erweitert, um Verkehrszeichen wie bspw. Straßenschilder erkennen und geografisch referenzieren zu können. Durch vorheriges Abrufen von Schild-Referenzpositionen aus der UDM können auf diese Weise auch Änderungen zwischen kommunalen Katasterdaten und der Realität erkannt werden, wie in Abbildung 17 dargestellt.

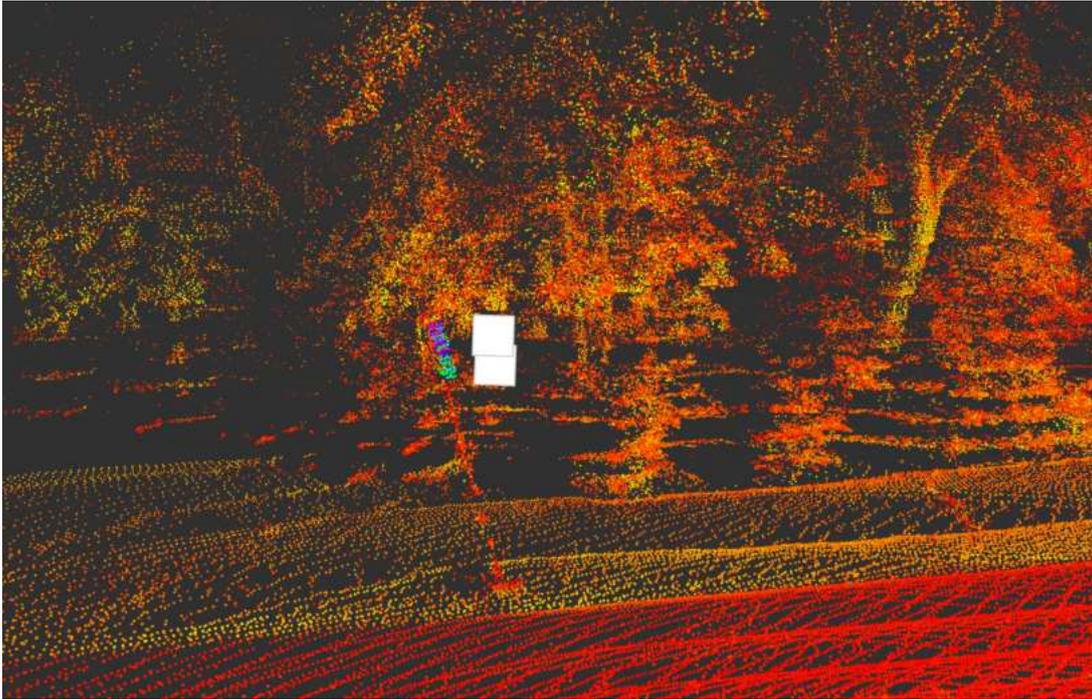


Abbildung 17: LiDAR-Punktwolke mit erkennbarer Abweichung von Schildpositionen aus der UDM (weiß)

Die Änderungen können in einer separaten Drittanwendung als „Spatial Issues“ (räumliche Vorgänge) verwaltet und für Entscheidungsträger bereitgestellt werden. Dazu existieren etablierte Issue-Tracking-Systeme wie bspw. JIRA, GitLab oder Redmine [9].

Die Kernidee hinter dieser Lösung ist die kontinuierliche Validierung und Aktualisierung einer Verkehrszeichendatenbank durch die Nutzung der bordeigenen Sensoren von Fahrzeugen – in erster Linie Kamera und LiDAR – und einer hochpräzisen Lokalisierung. Zunächst müssen die Sensoren des Fahrzeugs genau kalibriert und mit einem globalen Referenzrahmen synchronisiert werden (mit GNSS, IMU und georeferenzierten Karten). Während das Fahrzeug fährt, identifizieren und klassifizieren kamerabasierte Objekterkennungsalgorithmen Verkehrsschilder, während LiDAR-Daten verwendet werden, um das Vorhandensein und die Position dieser Schilder zu erfassen und zu bestätigen (siehe auch [10]). Beide Erkennungsströme fließen in einen Lokalisierungs- und Registrierungsschritt ein, bei dem das System die wahrgenommenen Verkehrsschilder mit Einträgen in der bestehenden Datenbank vergleicht. Wenn eine Diskrepanz festgestellt wird – z. B. ein fehlendes oder falsch klassifiziertes Schild – wird ein Aktualisierungsvorschlag erstellt (Abbildung 18). Diese Vorschläge können dann automatisch bearbeitet oder zur Überprüfung durch einen Menschen weitergeleitet werden, um sicherzustellen, dass die Verkehrszeichendatenbank immer auf dem neuesten Stand ist. Durch die Automatisierung eines Großteils des traditionell manuellen Prozesses der Datenbankpflege kann die Lösung den Arbeitsaufwand von Infrastrukturbetreibern erheblich reduzieren, die Genauigkeit verbessern und dabei helfen, die Datenbank mit der Realität auf der Straße zu synchronisieren.

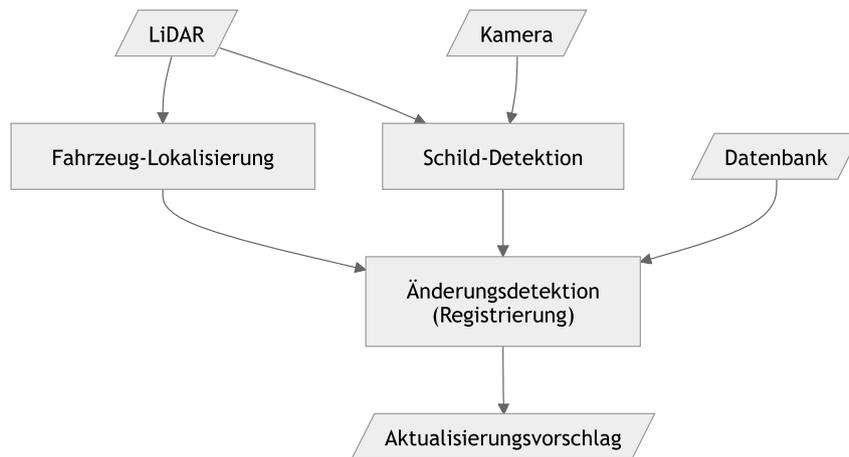


Abbildung 18: Ablauf der Änderungsdetektion mit Erstellung von Aktualisierungsvorschlägen

### 5.3. Use Case: Bedarfsgesteuerte Datenerfassung

Die Umkehrung der Idee zur automatischen Änderungsdetektion aus Abschnitt 5.2.2 führte zur Erarbeitung des Use Cases der *bedarfsgesteuerten Datenerfassung*. Hierbei „beauftragt“ ein kommunaler Akteur die Erfassung sensorischer Informationen im Verkehrsraum durch Setzen eines Markers in einer Kartenanwendung. Grundsätzlich kann diese Drittanwendung von beliebiger Stelle betrieben oder in andere Systeme integriert werden. Exemplarisch wurde im Projekt eine Anwendung entwickelt, die im Folgenden EDDY-Frontend (Abbildung 20) genannt wird. Das Frontend oder die Anwendung übertragen die markierte Stelle als sogenannten Trigger über OGC API Features an den Vektordatendienst der UDM. Fahrzeuge rufen den Trigger-Datensatz regelmäßig ab und sobald ein Fahrzeug die Nähe des markierten Ortes erreicht, wird ein Abbild des Umfelds mittels Kameras und/oder LiDAR-Sensoren erzeugt. Auch die Anforderung anderer Sensoraufnahmen wäre denkbar, beispielsweise die aktuelle Asphalttemperatur oder die Luftfeuchtigkeit. Die Kameradaten werden anonymisiert und die aufgenommenen Daten ebenfalls über die OGC-API-Features-Schnittstelle an die UDM gesendet, analog zur in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen Datenübertragung. Ergänzende Details zum Datenmodell für Trigger und resultierende Sensor-Snapshots sind in Anhang C.3 aufgeführt. Der anfordernde Nutzer kann im Anschluss die hochgeladenen Daten über das EDDY-Frontend sichten (Abbildung 21). Der Ablauf dieses Use Cases ist in Abbildung 22 dargestellt.

Um bereits im Design den Datenschutz angemessen zu berücksichtigen, wurde im Rahmen des Projektes EDDY eine Einrichtung entwickelt, die, direkt an den Kameras des Fahrzeugs angeschlossen, eine Anonymisierung durchführt, noch bevor diese Informationen das erste Mal nicht-flüchtig gespeichert oder übertragen werden. Abbildung 19 zeigt eine anonymisierte Beispielaufnahme [11].



Abbildung 19: Der Anonymizer im Einsatz [11]

Die bedarfsgesteuerte Datenerfassung wurde prototypisch umgesetzt und vom 22.–24.05.2023 auf dem [ITS-Europe-Congress 2023](#) als Simulation mit voraufgezeichneten Sensordaten präsentiert. Als Teil einer Vorstellung am 16.11.2023 beim Projektpartner LSBG in Hamburg wurde dieser Use Case erfolgreich live mit dem Testfahrzeug der HAW Hamburg gezeigt.

Zukünftig könnte die gesamte Verwaltung eines solchen Vorgangs transparent über das eingangs skizzierte Spatial-Issue-Tracking-System erfolgen und als unterstützender Prozess bei kommunaler Planung und Instandhaltung von Verkehrsinfrastruktur zum Einsatz kommen. Vor diesem Hintergrund wurde im Projektverlauf von EDDY der Austausch mit dem [Melde-Michel](#) der Stadt Hamburg gesucht, welcher ebenfalls als Verwaltungsplattform für unseren Use Case hätte dienen können. Aufgrund von knappen Ressourcen auf Seiten des Melde-Michels konnte eine Zusammenarbeit während der EDDY-Projektlaufzeit nicht vertieft werden. Im Falle einer Weiterführung der entsprechenden Projektinhalte empfiehlt es sich, erneut den Austausch zu suchen. Auch die Funktionalität von [BikeItRight](#) könnte in einem gemeinsamen Spatial-Issue-Tracking-System auf der Architektur von EDDY abgebildet werden.

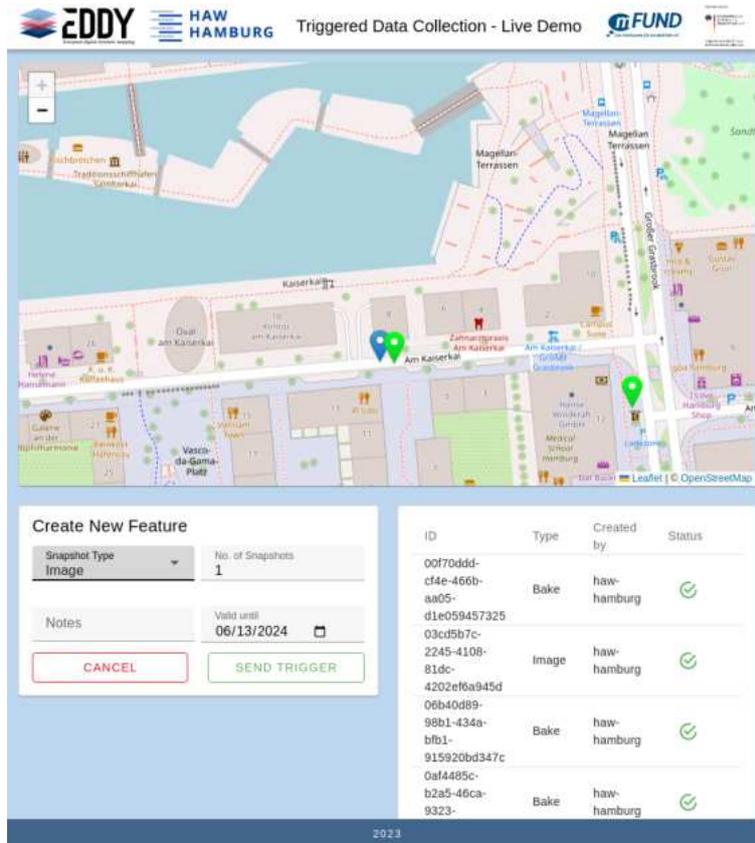


Abbildung 20: Beauftragen des Erfassens von Fahrzeug-Sensordaten durch Positionieren von Markern (Triggern) in Kartenanwendung

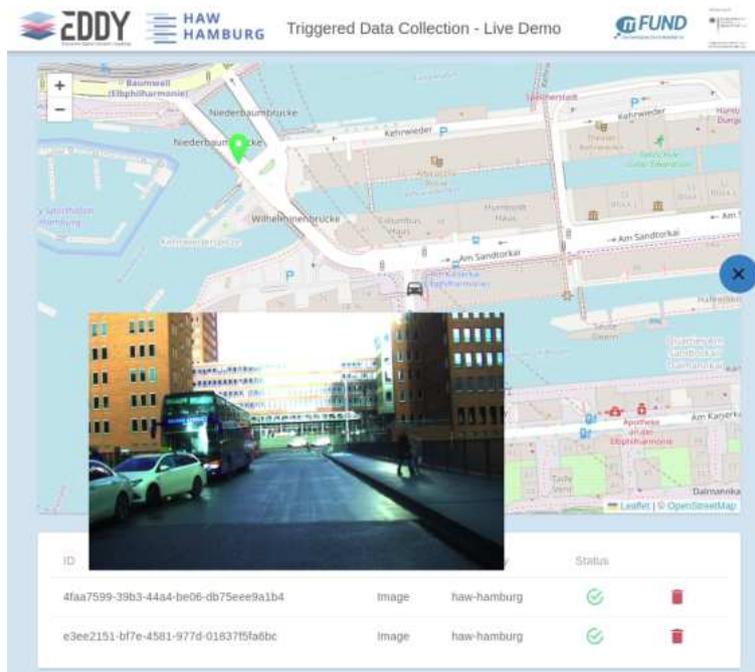


Abbildung 21: Sichten von bereitgestellten Fahrzeug-Sensordaten

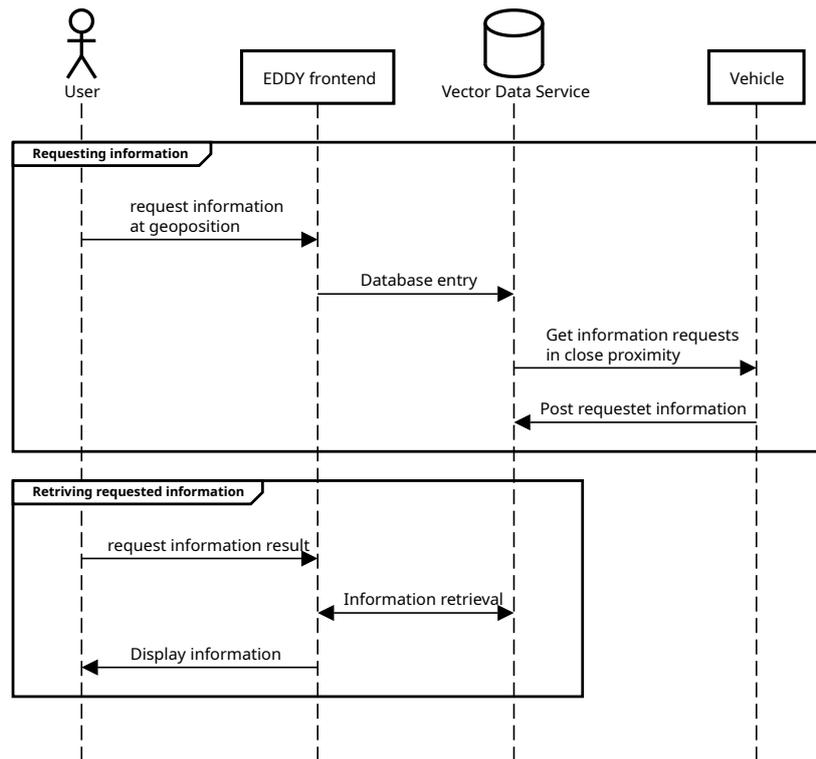


Abbildung 22: Ablauf der bedarfsgesteuerten Datenerfassung

#### 5.4. Use Case: Kontinuierliche sensorgestützte Datenerfassung

Der hier beschriebene Anwendungsfall basiert auf der anonymen Erfassung von Sensordaten durch Crowd-Sourcing. Anders als in Abschnitt 5.2.2 geht es hier nicht um die Erfassung von Objekten, sondern die vergleichsweise hochfrequente Auswertung von Boardsensorik mit dem Ziel aus der späteren Aggregation Erkenntnisse abzuleiten. Durch die Ausstattung verschiedener, leicht verfügbarer Fahrzeuge mit V2X-Geräten und zusätzlichen Sensoren können Daten gesammelt werden, um beispielsweise die Straßenbedingungen oder Umweltfaktoren in einer Stadt zu analysieren. In diesem Projekt wurden Fahrräder und Elektro-Scooter mit entsprechender Sensorik ausgestattet, um solche Daten zu erfassen und auszuwerten.

Die eingesetzten Sensortypen umfassen vor allem Inertialsensoren (IMU), die Bewegungen des Fahrzeugs wie Beschleunigungen und Rotationen messen. Diese Sensoren können insbesondere Vibrationen und Erschütterungen detektieren, die beim Überfahren von Unebenheiten oder Schlaglöchern auftreten. Zusätzlich können Sensoren zur Erfassung von Umgebungslicht, Geräuschpegel oder anderen Umweltdaten integriert werden.

Im Rahmen des Projekts wurden zwei Systeme entwickelt: eines von der HAW Hamburg auf Fahrrädern und eines vom CIT für Elektro-Scooter. Als Beispiel verwendete das CIT einen Inertialsensor des Typs ISM330DHCXTR von STMicroelectronics [12]. Dieser Sensor erfasst präzise Beschleunigungs- und Rotationsdaten, die zur Analyse der Fahrbahnoberfläche genutzt werden können.

Mithilfe der Architektur für Stream-basierte Datenverarbeitung in Abbildung 23 können Sensordaten (sowie V2X-Objektinformationen, siehe Abschnitt 5.7) gesammelt, ausgewertet und in

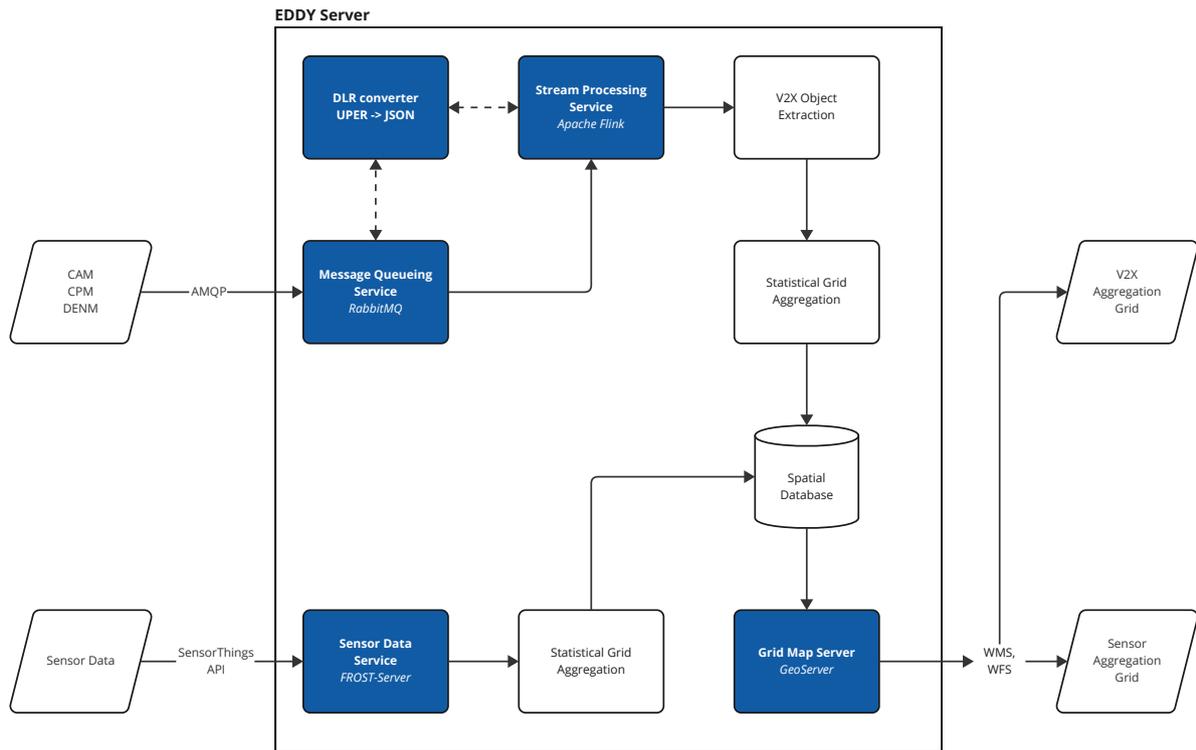


Abbildung 23: Architektur zur Verarbeitung und Aggregation von Sensor- und V2X-Daten

einheitlichen Gitterzellen aggregiert werden, um Informationen über die Qualität von Straßen und Fahrradwegen zu gewinnen. Für das Entgegennehmen von Sensordaten von Scootern und Fahrrädern wird OGC SensorThings API verwendet, siehe Architekturentscheidung 002. Abbildung 24 zeigt die Ermittlung der Qualität von Fahrradwegen durch die HAW Hamburg, wobei (a) die Sensorrohdaten auf dem Fahrrad und (b) die Zusammenfassung und Auswertung über die untersuchte Strecke darstellen. Abbildung 25 illustriert das Auslesen des IMU-Sensors während der Fahrt über ein Schlagloch durch CIT.

Um den Datenschutz der Nutzer zu gewährleisten, werden die im Anschluss aggregierten Sensormesswerte nur ausgegeben, wenn eine bestimmte Schwelle an Ereignissen überschritten wurde – wie in Abschnitt 5.7 detailliert beschriebenen. Dadurch wird verhindert, dass Einzelevents innerhalb eines Zeitraums oder einer Gitterzelle identifizierbar sind. Diese Maßnahme stellt sicher, dass individuelle Fahrten nicht zurückverfolgt werden können und die Privatsphäre der Nutzer geschützt bleibt.

Die Klassifizierung der Daten erfolgt unabhängig von fahrzeugspezifischen Eigenschaften und basiert auf physikalischen Größen. Die Übersetzung und Interpretation der gemessenen Größen obliegt dem anfragenden Nutzer. Zum Beispiel kann ein bestimmter Vibrationswert für ein Fahrrad als „gut“, für einen Scooter jedoch als „schlecht“ bewertet werden. Unser Server kann verschiedene Darstellungsstile für unterschiedliche Fahrzeugtypen wie „Scooter“ oder „Fahrrad“ anbieten, um den spezifischen Anforderungen gerecht zu werden.

In Gesprächen hat sich gezeigt, dass über verteilte mobile Sensoren erfasste Daten im behördlichen Kontext nur schwer verwendet werden können. Oft gibt es standardisierte, gesetzlich

vorgeschriebene Messverfahren. Die Skalierbarkeit des Systems ermöglicht aber den Einsatz in neuen Anwendungsfeldern. Ein Verweis auf das Projekt [DEUS](#) zeigt zum Beispiel, wie solche Ansätze im Katastrophenmanagement eingesetzt werden können, indem die Ausbreitung von Schadstoffen bei einem Brand durch die Auswertung von Echtzeitsensordaten nachvollzogen wird. Weitere Nutznießer könnten Asthmatiker bei der Planung ihres Alltags oder Ausdauersportler bei der Auswahl ihrer Trainingszeiten und Gebiete sein.

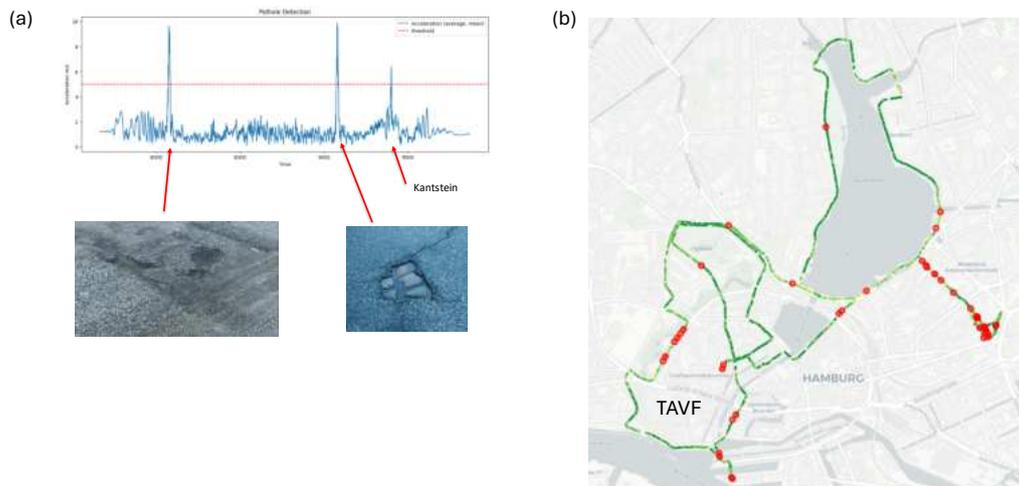


Abbildung 24: Ermittlung der Qualität der Qualität der Fahrradwege durch HAW Hamburg. (a) Sensorrohdaten auf dem Fahrrad. (b) Zusammenfassung und Auswertung über die untersuchte Strecke.

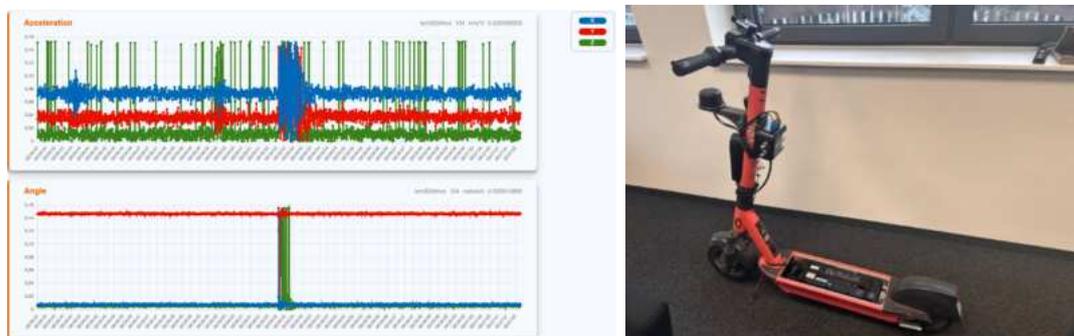


Abbildung 25: Auslesen des IMU-Sensors während der Fahrt über ein Schlagloch durch CIT und der aufgerüstete VOI Scooter

## 5.5. Use Case: V2X-Nachrichten über zentralen Server

Vehicle-to-Everything (V2X)-Kommunikation ermöglicht den Austausch von Echtzeitdaten zwischen Verkehrsteilnehmenden und Infrastruktur, um sicherheitskritische und verkehrsoptimierende Anwendungen zu unterstützen. Dafür wird üblicherweise der Kommunikationsstandard ITS-G5 verwendet, der allerdings eine spezielle technische Ausstattung aller Verkehrsteilnehmender voraussetzt. Im Projekt EDDY wurde ein serverbasierter Ansatz entwickelt, der das

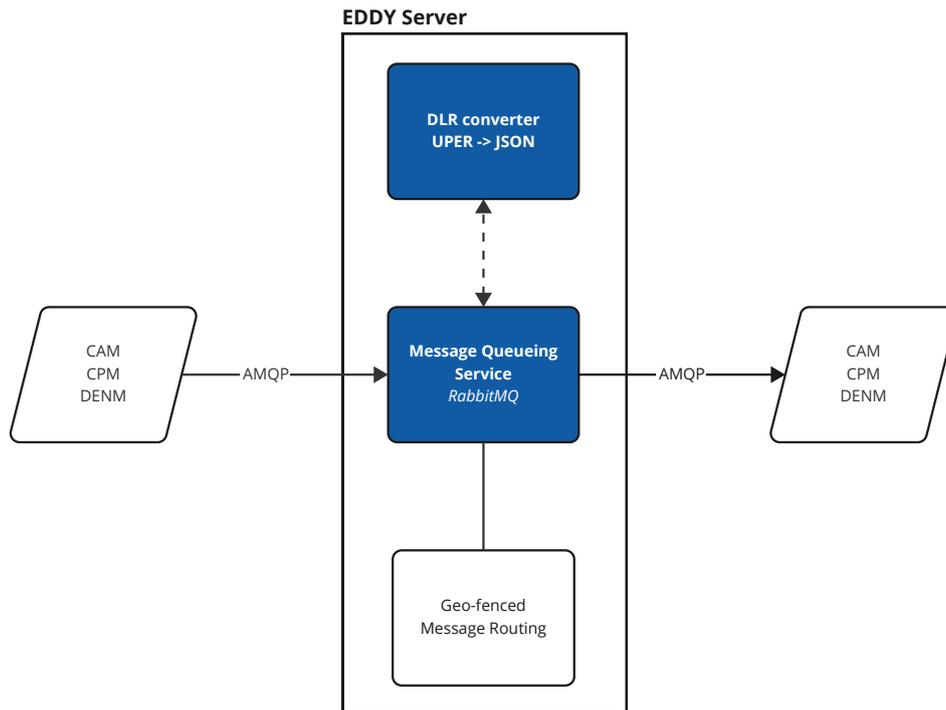


Abbildung 26: Architektur für V2X-Daten

Verteilen<sup>1</sup> von V2X-Nachrichten über eine allgemeine Internetschnittstelle realisiert. Dadurch wird einerseits auch vulnerablen Verkehrsteilnehmenden (VRU) „die Teilnahme“ bspw. über herkömmliche Mobiltelefone und das Mobilnetz ermöglicht. Andererseits eröffnen sich neue technische Anknüpfungsmöglichkeiten zur raum-zeitlichen Auswertung der V2X-Daten hinsichtlich kommunaler Fragestellungen (siehe Aggregation in Abschnitt 5.7). Dieses Kapitel beschreibt die Umsetzung des serverbasierten Systems zur räumlichen Verteilung von V2X-Nachrichten.

Mithilfe der V2X-Architektur in Abbildung 26 können die Nachrichtentypen CAM, DENM, und CPM (Cooperative Awareness Message, Decentralized Environmental Notification Message, Collective Perception Message) über eine Internet-Schnittstelle mit der UDM ausgetauscht werden. Das Verfahren lässt sich darüber hinaus um weitere Nachrichtentypen erweitern. Zum Austausch wird das Advanced Message Queuing Protocol (AMQP) verwendet, dessen Implementierung auf Server-Seite durch einen [RabbitMQ](#)-Broker realisiert ist. Der Broker ermöglicht Publizieren und Konsumieren von Nachrichten. Architekturentscheidung 004 legt die technischen Beweggründe für die Wahl von AMQP und RabbitMQ dar. Folgende Nachrichtenversionen werden für den Austausch mit der UDM verwendet:

- CAM-Version ETSI EN 302 637-2 v1.4.1, siehe Architekturentscheidung 006
- CPM-Version ETSI TS 103 324 v2.1.1, siehe Architekturentscheidung 007
- DENM-Version ETSI EN 302 637-3 V1.3.1, da aktuellste Version, die problemlos von allen Partnern unterstützt wird

<sup>1</sup>Die UDM selbst generiert keine eigenen V2X-Nachrichten. Dies würde bspw. die Implementierung einer komplexen Fusion/Deduplizierung von Objektinformationen auf Server-Seite voraussetzen, siehe Abschnitt 5.7.3.

Es werden generell immer alle Nachrichten über den Broker geleitet, das heißt, es findet keine Filterung der CAM/CPM/DENM nach Zeitstempeln statt. Ob eine Nachricht relevant ist, obliegt demnach dem konsumierenden Nutzer. Die Nachrichtenübermittlung zum und vom RabbitMQ-Broker findet im Format ASN.1 Unaligned Packed Encoding Rules (UPER) statt. Die Verwendung des UPER-Formats für die V2X-Nachrichten bietet mehrere Vorteile:

- *Dateneffizienz*: UPER ist eine binäre Kodierungsmethode, die Nachrichten in kompakter Form darstellt. Dies reduziert die Größe der Nutzlast (payload) erheblich und spart Bandbreite, was insbesondere bei der Übertragung über Mobilfunknetze von Vorteil ist.
- *Interoperabilität*: Da UPER ein Standard der ASN.1-Familie ist, können V2X-Geräte die Nachrichten direkt in ihre Software-Pipelines integrieren, ohne zusätzliche Konvertierungsschritte. Dies vereinfacht die Implementierung und verbessert die Kompatibilität zwischen verschiedenen Systemen.
- *Echtzeitfähigkeit*: Die effiziente Kodierung und Dekodierung von UPER-Nachrichten ermöglicht eine schnelle Verarbeitung, was für zeitkritische Anwendungen wie V2X-Kommunikation entscheidend ist.

Die Details zum V2X-Datenmodell in Anhang C.4 erläutern, wie eine UPER-kodierte Nachricht mit einem Header versehen wird, der alle notwendigen Informationen enthält, um die Nachricht auf Server-Seite korrekt verarbeiten zu können. Im Folgenden wird erläutert, welche Rolle diese zusätzliche Server-Komponente in EDDY spielt und wie der Nachrichtenaustausch von „Publishern“ und „Consumern“ abläuft.

### 5.5.1. Empfang, Verarbeitung und Weiterverteilung von Nachrichten

Die Komponente des RabbitMQ-Brokers in Abbildung 26 übernimmt lediglich das Entgegennehmen von V2X-Nachrichten eines Publishers über einen *Exchange* und das Weiterleiten dieser Nachrichten mittels *Routing Key* an eine *Queue*, die wiederum von einem Consumer abonniert werden kann. Das ermöglicht allerdings noch kein räumliches Verteilen von Nachrichten. Für diesen Zweck wurde in EDDY ein zusätzlicher V2X-Server implementiert, der es einem Consumer ermöglicht, auf Nachrichten innerhalb eines spezifizierten Interessensgebiets „zu lauschen“. Der V2X-Server agiert im Grunde als Consumer und Publisher zugleich, der Nachrichten von der Queue „v2x-server“ abonniert und diese passend zu räumlichen Interessensfiltern anderer Consumer weiterverteilt. Für diesen Zweck deklariert der V2X-Server zunächst den generischen Exchange „v2x“, an den alle V2X-Nachrichten aller Publisher im Projekt gesendet werden (siehe Anhang C.4). Somit werden alle Nachrichten *immer* über den V2X-Server weiterverarbeitet, bevor sie anderen Consumern bereitgestellt werden.

Das Sequenzdiagramm in Abbildung 27 zeigt, wie V2X-Nachrichten über die AMQP-Schnittstelle des RabbitMQ-Brokers verallgemeinert publiziert und von ihr konsumiert werden können:

- Ein Publisher sendet UPER-kodierte Nachrichten an den zentralen Exchange „v2x“ des RabbitMQ-Brokers. Die Nutzlast (payload) enthält Metadaten zur Fahrzeugidentifikation sowie Geokoordinaten, die vom V2X-Server automatisch dekodiert werden.

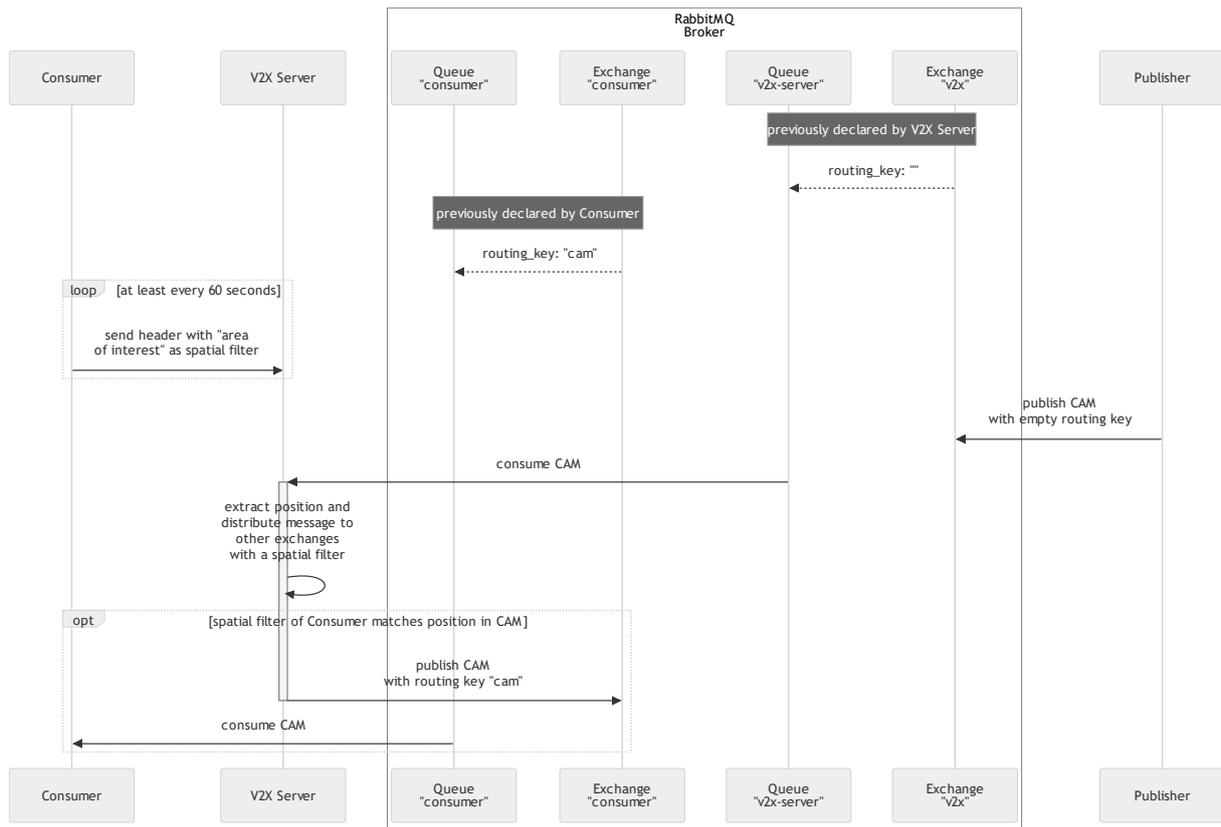


Abbildung 27: Sequenzdiagramm zum generischen Publizieren und Konsumieren über den RabbitMQ-Broker mit EDDY-V2X-Server, der das räumliche Verteilen von Nachrichten an interessierte Consumer steuert.

- Ein Consumer erstellt individuelle Exchanges und Queues, die er für den Nachrichtempfang abonniert. Um tatsächlich Nachrichten empfangen zu können, muss er anschließend zuerst eine Anfrage mit seinem Interessensgebiet (area of interest) an den V2X-Server senden. Das Gebiet kann auf zwei unterschiedliche Weisen definiert werden (Details in Anhang C.4):

1. als geografischer Mittelpunkt (Längen- und Breitengrad) mit Radius (in Metern)
2. als komplexes Polygon bestehend aus drei oder mehr Punkten

Der Consumer muss sein Interessensgebiet regelmäßig aktualisieren – aktuell mindestens alle 60 s –, da der V2X-Server ansonsten die Verteilung von Nachrichten an dessen Exchange stoppt.

- Der V2X-Server verknüpft den Exchange des Consumers mit dem angegebenen Interessensgebiet durch einen räumlicher Filter („Geo-fenced Message Routing“ in Abbildung 26).
- Der V2X-Server prüft jede an seiner Queue „v2x-server“ eingehende Nachricht, ob deren extrahierte Objektkoordinaten innerhalb eines aktiven Interessensgebiets liegen. Nur dann werden sie an den entsprechenden Exchange zur Weiterverteilung an einen Consumer weitergeleitet. Dies ermöglicht:

- *Echtzeit-Abonnements*: Mobile Abonnenten passen ihr Interessensgebiet dynamisch an (z. B. ein Radfahrer, der seinen Standort ständig aktualisiert)
- *Ressourcenschonung*: Reduktion der Netzwerklast durch Vermeidung globaler Nachrichtenverteilung (broadcast)

Die temporäre Dekodierung von Nachrichten durch den V2X-Server dient ausschließlich der Extraktion von Metadaten wie Geokoordinaten, Nachrichtentyp, Zeitstempel. Die ursprüngliche UPER-kodierte Nachricht wird unverändert weitergeleitet.

### 5.5.2. Unterstützung nicht standardisierter Nachrichtenformate

Während der EDDY-V2X-Server Nachrichten des Typs CAM und DENM nativ verarbeiten kann, fehlt die Dekodierungslogik für neuere Formate wie der CPM oder proprietäre Forschungsnachrichten. Für diesen Zweck wird vom DLR ein zusätzlicher Konvertierungsdienst bereitgestellt, der bei Bedarf vom V2X-Server kontaktiert wird (siehe Abbildung 26). Forschungsprojekte können benutzerdefinierte ASN.1-Definitionen oder neue, sich noch in Entwicklung befindende Definitionen als Plug-ins in diesen Konvertierungsdienst integrieren. Diese werden automatisch erkannt und ermöglichen die vollständige Dekodierung spezieller Nachrichtenformate. Änderungen am V2X-Server und RabbitMQ-Broker sind dafür nicht notwendig, da diese zur Verarbeitung und Weiterleitung der originalen UPER-Nachrichteninhalte lediglich die Metadaten aus dem Nachrichten-Header verwenden (Details zum Header in Anhang C.4).

### 5.5.3. Web-Anwendung zur CAM-Generierung für Testzwecke

Um die Funktionsweise des RabbitMQ-Brokers und des EDDY-V2X-Servers in Testumgebungen zu validieren, wurde beim DLR eine plattformunabhängige Web-Anwendung entwickelt. Die App ermöglicht es, CAM über eine vereinfachte Website simuliert zu erzeugen, ohne auf physische Fahrzeuge oder komplexe V2X-Hardware angewiesen zu sein. Abbildung 28 zeigt die Benutzeroberfläche der App mit Dropdown-Liste zur Wahl des simulierten Nutzertyps und einem einzelnen Button, der zwei Modi unterstützt:

- *Start*: Bei Aktivierung beginnt die App kontinuierlich die Positionsdaten des (Mobil)Geräts zu erfassen. Pro Messung werden mit über den Schieberegler eingestellter Frequenz folgende Rohdaten an das DLR-Backend gesendet, woraus automatisch eine CAM erstellt und an den RabbitMQ-Broker gesendet wird:
  - Wählbare Geräte-ID
  - Nutzertyp (Fußgänger, PKW, Radfahrer)
  - Zeitstempel im ISO-8601-Format
  - Aktuelle Geokoordinaten (Breiten- und Längengrad in WGS 84)
- *Stop*: Beendet die Datenerfassung und Übertragung.

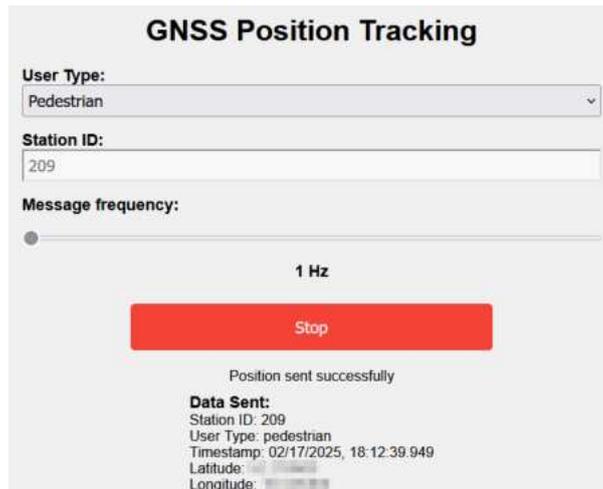


Abbildung 28: Web-Anwendung zur CAM-Generierung für Testzwecke

#### 5.5.4. Datenschutz bei V2X-Kommunikation über zentralen Server

Mit der Verteilung von V2X-Nachrichten über einen zentralen Server statt über ITS-G5 treten neue Herausforderungen hinsichtlich des Datenschutzes auf. Bei der Kurzreichweitenkommunikation ist der Empfängerkreis physikalisch auf wenige 100 m beschränkt. Es besteht zwar Missbrauchspotential durch flächendeckend verteilte Empfangsstationen, unter normalen Umständen lassen sich Trajektorien, bedingt durch die fortlaufend wechselnde Sender-ID, aber nur über kurze Strecken nachverfolgen. Der Mechanismus der anonymisierten, wechselnden IDs bleibt auch bei der zentralisierten V2X-Kommunikation erhalten. Insbesondere bei wenigen Teilnehmenden kann es allerdings möglich sein, die ID-Wechsel nachzuvollziehen und auf diese Weise vollständige Trajektorien nachzubilden. Eine vollends zufriedenstellende Lösung zum Datenschutz konnte im Projekt leider nicht gefunden werden. Zu den diskutierten Ansätzen gehörten:

- *Beschränkte räumliche Abfrage*: Modellierung der physikalischen Grenzen durch Beschränkung der Abfrage auf Empfänger im Umkreis einiger 100 m. Der Mechanismus kann allerdings ähnlich wie bei ITS-G5 umgangen werden, indem eine Vielzahl an räumlich verteilten Empfängern erstellt wird. Diese ließen sich von böswilligen Akteuren sogar simulieren (Spoofing).
- *Graubereiche in der Systemabdeckung*: Der V2X-Server verteilt Nachrichten nur aus ausgewählten, nicht zusammenhängenden Gebieten. Unter Umständen lässt sich aus in der Nachricht enthaltenen Informationen – z. B. der Fahrzeuggröße – weiterhin ein eindeutiger Bezug herstellen.
- *Zugriff nur für autorisierte Nutzer*: unterbindet unter anderem das Spoofing, bringt aber bei individueller Prüfung einen erhöhten Verwaltungsaufwand mit sich.

Durch eine Kombination der Maßnahmen lässt sich ein ähnliches Datenschutzniveau wie bei der Kurzreichweitenkommunikation über ITS-G5 erreichen. Gleichzeitig wird aber das Nutzungspotential der Daten reduziert. Es gilt die unterschiedlichen Rechte und Interessen abzuwägen und einen Kompromiss zu finden.

## 5.6. Use Case: V2X zum Schutz vulnerabler Verkehrsteilnehmender (Kollisionswarnungen)

Als weiterer exemplarischer Anwendungsfall, der die Funktionsweise des EDDY-V2X-Servers und die Anbindung externer Dienste demonstriert, wurde in Kooperation mit der Continental AG deren Kollisionswarnsystem Digital Safety Assistant (DSA) angeschlossen, um insbesondere den Schutz von vulnerablen Verkehrsteilnehmenden mit Hilfe von Mobilfunk-gestützter V2X-Kommunikation im Straßenraum zu erproben. Dabei wurde untersucht, inwieweit zentralisierte Kollisionswarnungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit als städtischer Service weiterverfolgt werden sollen und ob die UDM in diesem echtzeitkritischen Kontext eingesetzt werden kann.

Das System von Continental arbeitet mit definierten Hotspots in denen Verkehrsteilnehmende über Mobilfunk Eigeninformationen insbesondere zur aktuellen Position, Geschwindigkeit und Richtung an eine zentrale Kollisionswarnungsapplikation schicken. Dies erfolgt über eine nicht standardkonforme herstellerspezifische Schnittstelle in einer an die CAM angelehnten Nachricht. Auf dieser Grundlage können von Continentals System Vorhersagen zur Trajektorie getroffen werden und auf Kollisionspotential mit anderen Trajektorien untersucht werden. Wird eine mögliche Kollision erkannt, können die entsprechenden Verkehrsteilnehmenden über eine an die DENM angelehnte Nachricht gewarnt werden. Die Warnung kann beispielsweise über akustische Signaltöne, Vibrationen oder optische Signale verdeutlicht werden. Abbildung 29 zeigt die Darstellung auf einem Smartphone an den eingesetzten Fahrrädern und der Weboberfläche des Projektpartners.

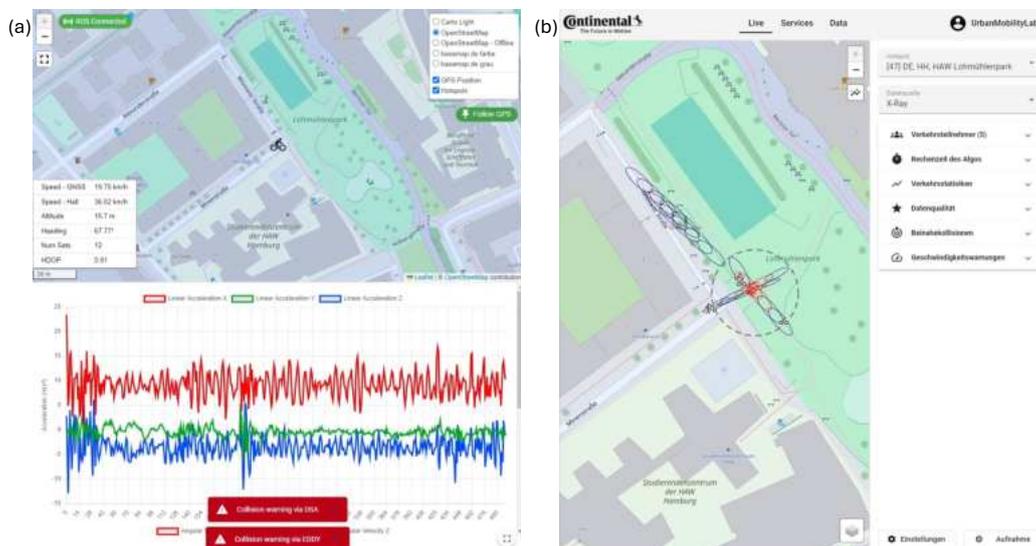


Abbildung 29: (a) Darstellung auf den Fahrrädern und (b) der Weboberfläche des Projektpartners Continental (aus [13]).

Mit der Schnittstelle des DSA kann beispielsweise über die gleichnamige Mobilanwendung Digital Safety Assistant kommuniziert werden. Es können aber auch andere Anwendungen oder Systeme angeschlossen werden, wie zum Beispiel der EDDY-V2X-Server aus dem vorangehenden Abschnitt 5.5. Da dieser standardkonforme Nachrichten versendet, musste zu Überbrückung

ein Translator entwickelt werden, der die Nachrichten übersetzt und für alle Kommunikationspartner passend formatiert. Der zugehörige Kommunikationspfad wird im Sequenzdiagramm in Abbildung 30 gezeigt. Durch den Anschluss an die EDDY-Architektur kann der Service von Nutzenden der UDM ohne eine dedizierte Applikation verwendet werden, insbesondere wenn sie ohnehin über standardmäßige V2X-Kommunikation kommunizieren. Es ist eine Integration in Fahrzeugsysteme, Fahrradcomputer, Infrastrukturanlagen oder Apps mit breiterem Aufgabenbereich denkbar. So können auch Verkehrsteilnehmende geschützt werden, die sich nicht im Ökosystem des DSA befinden.

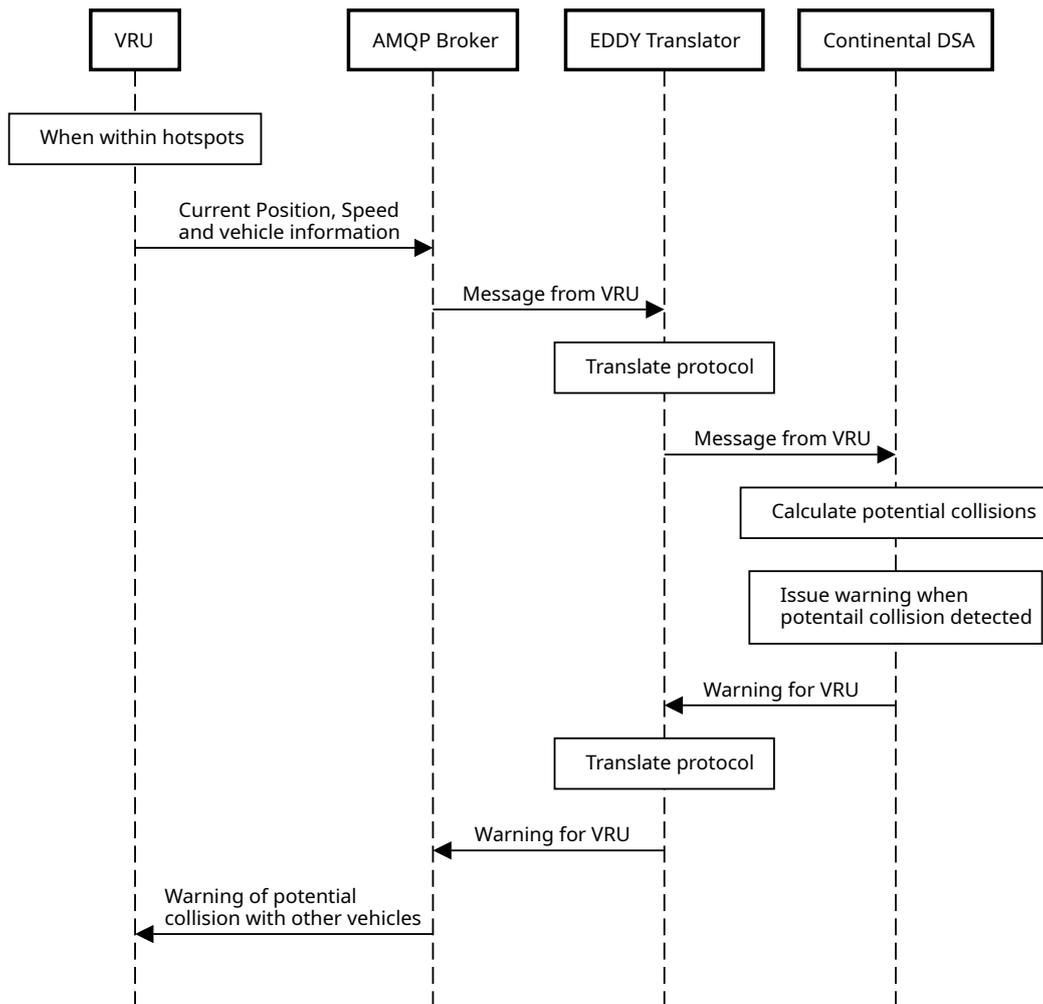


Abbildung 30: Darstellung Kommunikation mit DSA der Continental AG mit Anbindung an die EDDY-Infrastruktur

Im Zuge des Projektes EDDY wurden im Bereich Berliner Tor in Hamburg umfangreiche Untersuchungen zur Wirksamkeit des Systems unter verschiedenen Betriebsbedingungen durchgeführt. Im Ergebnis lässt sich zusammenfassen, dass eine hohe Verfügbarkeit und Funktion des Systems an folgende Voraussetzungen geknüpft ist:

- Fehlerfreier und guter GNSS-Empfang
- Gute und stabile Abdeckung durch das genutzte Mobilfunknetz ohne Wechsel der Mobil-

funkzelle im relevanten Bereich

- Gute, Latenz- und Jitter-arme Anbindung des Servers für die Kollisionsvorhersage und ggf. weiteren Servern bei der Nutzung von zwischengelagerten Diensten, beispielsweise der UDM (Latenzen zur UDM sind nicht zwingend additiv)
- Gültige, gemeinsame Zeitbasis bei allen Teilnehmenden und involvierten Diensten

Sind diese Voraussetzungen erfüllt, werden gültige und wirksame Warnungen erzeugt, die zur Vermeidung von Kollisionen führen können. Ist nur eine Voraussetzung nicht erfüllt, so kommt es zu fehlenden oder nicht korrekten Warnungen.

Aufgrund der hohen Anforderungen ist ein flächendeckender Einsatz des Kollisionswarnsystems unter den aktuellen technischen Gegebenheiten wahrscheinlich nicht zielführend. Ein Einsatz an ausgewählten Knotenpunkten mit günstigen Bedingungen bezüglich der oben genannten Voraussetzungen kann aber helfen, Unfälle zu reduzieren, sowohl unmittelbar als auch über die Analyse der aufkommenden Warnungen (siehe beispielsweise Abschnitt 5.7.1).

Eine detaillierte Betrachtung der Untersuchungsergebnisse in Verbindung mit dem DSA findet sich in einem separaten Bericht, der angefragt werden kann.

## 5.7. Use Case: Aggregation von V2X- und Sensordaten

Ein weiteres Ziel des Projekts war, Informationen über die Qualität von Straßen und Radwegen aus Sensordaten von Fahrrädern und Scootern (Abschnitt 5.4) ableiten zu können. Auch die in Abschnitt 5.5 vorgestellte serverbasierte Verteilung von V2X-Nachrichten eröffnet ein großes Anwendungsfeld zur Beantwortung kommunaler Fragestellungen hinsichtlich des Verkehrsgeschehens und der Verkehrssicherheit. So können durch Extraktion und Weiterverarbeitung von Objektinformationen aus V2X-Nachrichten Rückschlüsse auf bspw. kritische Verkehrspunkte mit Beinaheunfällen oder die Verkehrsstärke gezogen werden, wie in Abbildung 31 beispielhaft gezeigt. Für den Anwendungsfall der Aggregation wurde in EDDY eine Systemarchitektur entwickelt, die beide Datenströme – Sensor- und V2X-Daten – mittels raum-zeitlicher Aggregation zu Gitterzellen verarbeitet, wie bereits in Abbildung 23 dargestellt. Beide Datenströme arbeiten nach einem Publish-Subscriber-Prinzip, bei dem Daten aus einer Quelle emittiert und über eine Warteschlange potenziellen Konsumenten bzw. Abonnenten zum Abrufen bereitgestellt werden. Zur raum-zeitlichen Verarbeitung wurde in EDDY ein Streaming-Daten-Verarbeitungsprozess entsprechend als normaler Konsument dieser eingehenden Daten entwickelt.

Für die statistische Aggregation in einheitliche Gitterzellen wird der [H3-Index](#) verwendet, siehe Architekturentscheidung 011. H3 als ein Discrete Global Grid System (DGGS) definiert ein weltumspannendes Gitter hexagonaler Gitterzellen in hierarchischen Auflösungsstufen. Jede Gitterzelle ist durch ihren Index eindeutig beschrieben. Aus dem Index lassen sich sehr performant der Mittelpunkt und die Eckkoordinaten eines Hexagons ableiten und daraus ein Vektor-Polygon erstellen. Solch ein Polygon – oder genauer gesagt dessen eindeutiger Index – lässt sich als räumlicher Aggregator verwenden, um beispielsweise beliebige Messwerte räumlich in einem gegebenen Zeitfenster „zu sammeln“. H3 gibt durch seine hierarchische Struktur die möglichen Auflösungen und daraus abgeleitet die zur Verfügung stehende Zellgröße pro Auflösung vor,

wie unter [H3 edge lengths](#) aufgeführt. Diese Vorgabe erleichtert es, sich auf die bestmögliche Zellgröße pro Aggregationsthema festzulegen. Auch ermöglicht die global eindeutige Zuordnung von Gitterzellen eine räumliche Vergleichbarkeit und Inbezugsetzung von thematischen Layern aus unterschiedlichen Quellen oder abweichenden Aufbereitungsprozessen, sofern diese dasselbe DGGS-Schema für die finale Datenaufbereitung befolgen.

Falls eine Anforderung darin besteht, möglichst robustes Verrechnen von Werten zwischen unterschiedlichen Hierarchieebenen zu ermöglichen – wie bspw. das Zusammenfassen von Werten kleiner Einzelzellen zu einer übergeordneten Zelle größerer Auflösung –, dann ist H3 nicht zwangsläufig das idealste Indizierungssystem, da sich die Hexagone unterschiedlicher Auflösungsstufen nicht überlappungsfrei ineinander überführen lassen. Hier können Konzepte mit rechteckigen Zellen wie S2 eine Alternative darstellen, siehe Details in Architekturrentscheidung 011.



Abbildung 31: Kartendarstellung aggregierter CAM-Nachrichten als Verkehrsstärke. Zunehmende Farbintensität bedeutet ein größeres Verkehrsaufkommen. Die Polygone sind mit Angabe eines zeitlichen Filters über standardisierte OGC-Schnittstellen abrufbar.

### 5.7.1. Unterschiedliche Aggregationsthemen als Karten-Layer der UDM

Im Folgenden werden die in EDDY erarbeiteten thematischen Aggregations-Layer mit ihren Eigenschaften hinsichtlich gewählter statistischer Methode, Zeitfenster und der Zellgröße beschrieben. Hierbei spielen Zeitfenster und Zellgröße eine wichtige Rolle für die datenschutzkonforme Verarbeitung. Beide Parameter wurden einerseits so grob wie möglich gewählt, um personenbezogene Information aus der Aggregation nicht ableiten zu können, und andererseits so fein wie nötig gehalten, um die Aussagekraft der Aggregation beizubehalten. Weiterhin wird anvisiert, Aggregationsergebnisse nur dann festzuhalten, wenn eine Mindestanzahl an Ereignissen

vorhanden ist. Damit sollen Einzelereignisse innerhalb eines Zeitraums/einer Zelle nicht identifizierbar sein. Der Schwellwert ist nach ersten Tests noch zu definieren. Wie in Abschnitt 5.7.2 zur technischen Umsetzung beschrieben, findet allerdings momentan noch ein Vorhalten von Einzelereignissen zu Entwicklungszwecken statt. Wenn zum Verarbeitungsende lediglich die Aggregationsergebnisse selbst bereitgestellt werden und die verarbeiteten Rohdaten verworfen wurden, kann von einem Closed-Loop-System gesprochen werden.

Mit dem entwickelten Verarbeitungssystem ist es generell möglich, weitere Aggregationsthemen als separate Geodaten-Layer umzusetzen, um bspw. auch Aussagen über zeitlich und räumlich veränderliche GNSS-Abdeckung oder Mobilfunkabdeckung treffen zu können.

**Kritische Knoten mit Beinaheunfällen** Die Anzahl der Ereignisse mit dem `causeCode` „collisionRisk97“ aus V2X-Nachrichten des Typs DENM, wie sie durch das Kollisionswarnsystem aus Abschnitt 5.6 generiert werden, ermöglicht Aussagen zu kritischen Knoten mit Beinaheunfällen. Dabei werden immer alle individuellen DENM-Ereignisse aggregiert, unabhängig vom Sender. Es wird keine Relation zur CAM hergestellt und es wird keine Deduplizierung durchgeführt. Aggregationen über andere `causeCode`-Typen sind generell auch möglich.

- Aggregationsmethode: `count(originatingStationID)` für alle „collisionRisk97“
- Räumlich:  $25 \times 25$  m oder größer, entspricht H3-Auflösung 11 mit Hexagon-Kantenlänge von  $\approx 28,7$  m
- Zeitlich: 15-minütlich oder größer

**Mittlere Geschwindigkeiten** Eine Mittlung von Geschwindigkeiten pro Zelle kann aus V2X-Nachrichten des Typs CAM erfolgen. Dabei erweist sich das kontraharmonische Mittel ([Lehmer-Mittel](#)) als geeignete statistische Methode, um unterschiedlich viele Nachrichten pro Zelle aufgrund unterschiedlicher „Aufenthaltsdauern“ von unterschiedlich schnellen Sendern zu berücksichtigen. Dies ermöglicht Aussagen zu „praktikablen“ Geschwindigkeiten für autonome Fahrzeuge im Gegensatz zu den durch Verkehrsregeln lediglich vorgegebenen Maximalgeschwindigkeiten.

- Aggregationsmethode: `contraharmonicMean(speed)`
- Räumlich:  $25 \times 25$  m oder größer, entspricht H3-Auflösung 11 mit Hexagon-Kantenlänge von  $\approx 28,7$  m
- Zeitlich: 15-minütlich oder größer

**Verkehrsstärke** Die Berechnung der Anzahl von Fahrzeugen pro Zelle aus V2X-Nachrichten des Typs CAM ermöglicht Aussagen zur Verkehrsstärke. Ein Problem hierbei stellt die systembedingte, regelmäßige Änderung der ID eines Verkehrsteilnehmers dar, was Aussagen zur Eindeutigkeit eines Senders über einen längeren Zeitraum erschwert. Dadurch werden Sender bei „längerer Verweildauer innerhalb einer Zelle“ momentan mehrfach gezählt.

- Aggregationsmethode: `count(stationID)`

- Räumlich:  $25 \times 25$  m oder größer, entspricht H3-Auflösung 11 mit Hexagon-Kantenlänge von  $\approx 28,7$  m
- Zeitlich: 15-minütlich oder größer

**Schlaglöcher** Aus Beschleunigungswerten von Scooter- und Fahrrad-Sensordaten können mit statistischen Methoden Schlaglochinformationen abgeleitet werden.

- Räumlich:  $10 \times 10$  m oder größer, entspricht H3-Auflösung 12 mit Hexagon-Kantenlänge von  $\approx 10,8$  m
- Zeitlich: täglich oder größer

**Straßenabschnittsbeschaffenheit** Aus Beschleunigungswerten von Scooter- und Fahrrad-Sensordaten können Aussagen zur Straßenabschnittsbeschaffenheit abgeleitet werden.

- Räumlich:  $10 \times 10$  m oder größer, entspricht H3-Auflösung 12 mit Hexagon-Kantenlänge von  $\approx 10,8$  m
- Zeitlich: täglich oder größer

**Luftqualität, Lärm und Lichtintensität** Mit Scooter- und Fahrrad-Sensordaten können ebenfalls Luftqualität, Lärm und Lichtintensität gemessen werden.

- Räumlich:  $50 \times 50$  m oder größer, entspricht H3-Auflösung 10 mit Hexagon-Kantenlänge von  $\approx 75,9$  m
- Zeitlich: stündlich oder größer

### 5.7.2. Umsetzung der Aggregation als Streaming-Prozesse mit Apache Flink

In EDDY handelt es sich bei den zu aggregierenden Daten um semi-dynamische Sensordaten (LDM-Layer 3) und dynamische V2X-Nachrichten (LDM-Layer 4), siehe Abschnitt 5. Diese Daten laufen über Message-Queuing-Schnittstellen in die UDM ein und sind daher prädestiniert für die Streaming-Daten-Verarbeitung. Für diesen Zweck wurde Apache Flink als freies Streamprozessor-Framework gewählt, siehe Architekturentscheidung 008.

Bei der Implementierung eines Aggregationsprozesses kommen verschiedene Varianten der Datenverarbeitung und Datenzwischenspeicherung infrage. Generell ist aus datenschutzrechtlicher Perspektive zu vermeiden, hochfrequente Sensor- und V2X-Rohdaten während des Verarbeitungsprozesses persistent zu speichern. Trotzdem sind diese Rohdaten vor allem in der Anfangsphase der Entwicklung notwendig, um auf technischer Ebene „ein Gefühl für die Daten zu bekommen“. Nur so können statistische Methoden, unterschiedliche Software-Komponenten und heterogene Verarbeitungskonzepte auf ihre Eignung zur Beantwortung der Forschungsfragen und im Hinblick auf Performance und Skalierbarkeit im Produktivbetrieb evaluiert werden. Aus diesem Grund bleiben die räumlichen Auflösungen der Eingangsdaten für die Datenakquise und Übertragung zum Server im Projektkontext vorerst unverfälscht, um eine bestmögliche

Basis für anknüpfende Aggregationen zu gewährleisten. Anhang D stellt mehrere in Betracht gezogene Varianten für die raum-zeitliche Aggregation mit ihren Vor- und Nachteilen gegenüber. Im Projekt EDDY wird eine Kombination aus zwei Varianten genutzt. Dies ermöglicht einerseits die performante Bereitstellung fertiger Aggregationsergebnisse großer Datenmengen über OGC-Schnittstellen unter Berücksichtigung datenschutzrechtlicher Aspekte (Variante 1) und andererseits genügend Flexibilität, um sich mit wechselnden Aggregationsparametern an die optimalen Aggregationsergebnisse heranzutasten (Variante 2).

Das eingangs in Abbildung 31 dargestellte Aggregationsthema der Verkehrsstärke eignet sich gut zur Erläuterung der Streaming-Datenverarbeitung mit Apache Flink. Die abgebildeten Hexagon-Zellen stellen ein Aggregationszeitfenster von 5 Minuten dar und wurden über den in Abbildung 32 beschriebenen Datenfluss aus CAM erstellt. Diese in einer räumlichen Datenbank persistierten Polygon-Geometrien werden direkt über einen GeoServer als Web Map Service (WMS) oder Web Feature Service (WFS) publiziert (vergleiche Architekturdiagramm in Abbildung 23). Dadurch wird automatisch gewährleistet, dass immer die aktuellsten Daten abrufbar sind, sobald neue Aggregationsergebnisse aus dem Streaming-Verarbeitungsprozess vorliegen. Über die standardisierten Schnittstellen lassen sie sich niedrigschwellig in Web-Mapping-Frameworks, Dashboards, Desktop- oder Mobilanwendungen einbinden.

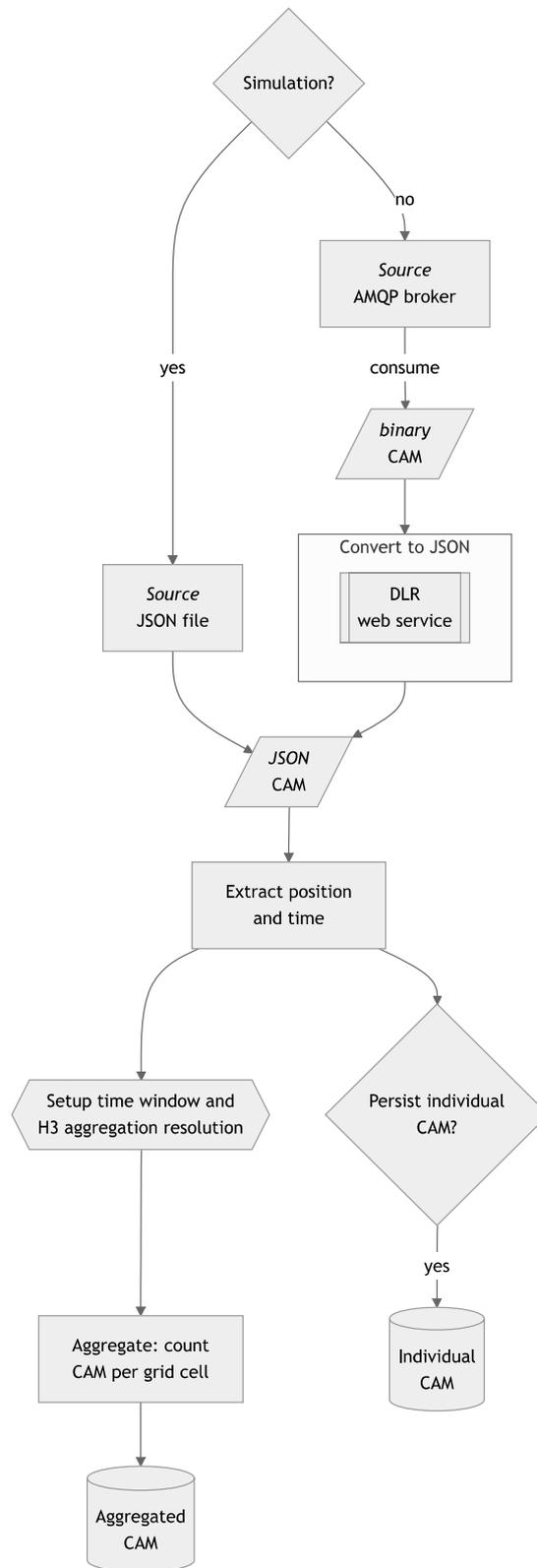


Abbildung 32: Datenflussdiagramm bei der Stream-basierten Verarbeitung von CAM-Nachrichten. Objekt-Positionen werden in einem wählbaren Zeitfenster mit wählbarer H3-Zellgröße aggregiert. Optional kann aus einer JSON-Datei simuliert werden; auch können optional Einzelnachrichten für Entwicklungszwecke persistiert werden.

### 5.7.3. Herausforderung der Zeitsynchronisation bei Verarbeitung von V2X-Daten

Die Kerneigenschaften des Broadcast-basierten V2X-Nachrichtenaustausches im ITS-Kontext liegen in der Dezentralität und in der hohen Nachrichtenfrequenz mit gleichzeitig kleinen Nachrichtengrößen. Für diesen Zweck sind die in einigen V2X-Nachrichtentypen enthaltenen *relativen* Zeitstempel ausreichend und sogar vorteilhaft. Genau diese Eigenschaft stellt allerdings eine große Herausforderung für den in EDDY zentralisierten, serverbasierten Weiterverarbeitungsansatz dar, denn jede Nachrichtenübermittlung über eine Internet-Schnittstelle führt zur zeitversetzten Verarbeitung von Informationen und jeder anknüpfende Verarbeitungsschritt fügt weitere Latenzen hinzu.

Im vorangegangenen Beispiel der CAM-Aggregation zur Ableitung der Verkehrsstärke ist beispielsweise zu beachten, dass der Zeitstempel `GenerationDeltaTime` einer CAM-Nachricht nur eine relative Zeitspanne darstellt, die lediglich etwa 60s abdeckt. Im Produktivbetrieb müssten die CAMs idealerweise bereits vom empfangenden RabbitMQ-Broker mit einem *absoluten* Server-Zeitstempel ergänzt werden, um sie sinnvoll über Zeitfenster von mehr als 60s aggregieren zu können. In diesem Beispiel passiert dies allerdings erst beim Extraktionsprozess in Apache Flink, dem die absolute Zeitreferenz einer CAM unbekannt ist. Demnach wäre eine Verarbeitung jeglicher Nachrichten hinfällig, die sich entweder in einer Message-Queue „aufgestaut“ haben oder derer, die zwischen Queue und Aggregationsprozess länger als etwa 60s „aufgehalten“ wurden.

Ein ähnliches Problem tritt bspw. bei der Verarbeitung von DENM auf, woraus kritische Verkehrsknoten identifiziert werden können. Um dies robust mit hoher Aussagekraft umsetzen zu können, müsste *serverseitig* eine Deduplizierung von Ereignissen unterschiedlicher Emittenten und idealerweise eine Korrelation mit Positionsinformationen aus CAM erfolgen. Dies setzt eine für alle Prozesse einheitliche und absolute Referenzzeit und Zeitsynchronisation voraus, die in der UDM momentan nicht gewährleistet wird. Für zukünftige Entwicklungen scheint der Ansatz zum „spatio-temporal alignment of loosely coupled sensor platforms“ [14] auch für die *serverbasierte* Verarbeitung in der UDM aussichtsreich zu sein.

## 6. Datenverarbeitung außerhalb der Urban Dynamic Map

Neben der Aggregation von Daten in Raster wie sie in Abschnitt 5.7 vorgestellt und als Komponente der UDM implementiert wurde, gibt es unzählige weitere Möglichkeiten zur Aufbereitung und Verwendung der Daten der UDM. Diese sind stets Use-Case- und Nutzer-spezifisch, die entsprechende Aufbereitung betrachten wir daher nicht als Aufgabe der UDM, vielmehr obliegt dies Drittanwendungen. Diese können vom Betreiber selbst stammen, aber auch von Dienstleistern. Drittanwendungen können in einigen Fällen auch Datenlieferant für die UDM sein. Der Projektpartner Ubilabs hat im Projekt die Rolle eines Entwicklers von Drittanwendungen eingenommen und eine Reihe von Datenverarbeitungs- und Visualisierungsmethoden demonstriert. Diese dienten zunächst der Machbarkeitsanalyse einzelner Komponenten und bildeten später die Grundlage für das **Projekt-Dashboard**, das die Möglichkeiten der UDM aufzeigt und ihre Funktionalität für verschiedene Stakeholder greifbar macht. Das Dashboard ist nicht als eigen-

ständiges Tool oder Produkt zu verstehen, sondern dient als Showcase für die Datennutzung der UDM. Im Folgenden werden die wesentlichen Entwicklungen vorgestellt.

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) stellt unter anderem **RADOLAN**-Wetterdaten bereit. Es wurde eine Verarbeitungskette implementiert, über die Niederschlagsdaten dreidimensional visualisiert werden können. Die Verarbeitung unterstützt sowohl historische Daten als auch Echtzeit- und Prognosedaten und ermöglicht damit auch die Analyse von Wetterverläufen. Die Integration erfolgt über standardisierte DWD-Schnittstellen und läuft weitestgehend automatisiert ab. Zukünftig kann der Datenaustausch ebenfalls über die UDM umgesetzt werden, wie in Abschnitt 7.3 skizziert.

Die aktuelle Phase der Lichtsignalanlagen, die die Freie und Hansestadt Hamburg im Rahmen des Projekts Traffic Light Forecast von der UDP über die OGC SensorThings API bereitstellt, kann über die gleiche Schnittstelle der UDM und deren Nutzenden zur Verfügung gestellt werden. Zur Demonstration der Machbarkeit wurde eine ansprechende Visualisierung dieser Daten in Echtzeit auf dem Dashboard eingebunden.

Die in Abschnitt 5.5 behandelten CAM können von einer Drittanwendung zu Trajektorien verknüpft werden und hinsichtlich des **Ein- und Austritts in den Kreuzungsbereich** analysiert werden. So können detaillierte Kenntnisse über die Verkehrsströme im Kreuzungsbereich gewonnen werden, was insbesondere zur Optimierung von Schaltprogrammen von Licht-Signal-Anlagen erforderlich ist.

Zur Visualisierung von **LiDAR-Punktwolken**, wurde eine web-basierte Lösung entwickelt. Dieses ermöglicht die Darstellung der von Fahrzeugen erfassten Daten direkt im Browser. Durch die Integration in die kartenbasierte Darstellung können die Punktwolken im räumlichen Kontext auf Basis von 3D-Kartendaten betrachtet werden. Der Ansatz zeigt, dass auch große Punktwolken im Browser verarbeitet und dargestellt werden können. Zur Demonstration der Machbarkeit wurden im Projekt singuläre Aufnahmen verarbeitet. Das Verfahren ließe sich aber auch auf aggregierte LiDAR-Punktwolken aus Abschnitt 5.1.1 anwenden.

Die Entwicklung der vorgestellten Prozessierungen erfolgte von Beginn an mit Blick auf ihre spätere Integration in Anwendungen, eine Rolle, die das Projekt-Dashboard stellvertretend einnimmt. Entsprechend wurde bei der Konzeption besonderer Wert auf Modularität und Standardkonformität gelegt. Die entwickelten Verarbeitungs- und Visualisierungsmöglichkeiten lassen sich dadurch flexibel einsetzen und bei Bedarf durch weitere Komponenten ergänzen. Die Erkenntnisse aus den Implementierungen, insbesondere zur **Standardisierung der Datenformate, Performanz der Visualisierung, Ressourcenverbrauch im Browser, Integration in Anwendungen und Kombination mit anderen Datenquellen** können später genutzt werden um die Verwendung von Daten in Anwendungen, gerade auch solchen die als Tool genutzt werden, zu optimieren.

Das Projekt-Dashboard bereitet außerdem die Inhalte aus den Use Cases aus Abschnitt 5 graphisch auf. Zum Abschlussevent wurden dafür Echtzeitdaten der UDM verwendet. Zur besseren späteren Verwendung des Dashboards wurden einzelne Inhalte in Form von Screenshots und Präsentationen archiviert. Der entwickelte Dashboard-Prototyp ist unter [EDDY-Dashboard](#) online einsehbar. Abbildung 33 zeigt die interaktive Übersichtskarte des Dashboards, worüber auf die einzelnen Inhalte zugegriffen werden kann.



Abbildung 33: [EDDY-Dashboard](#) zur Visualisierung der Use Cases

Die Prozessierung der Daten und die beispielhafte Implementierung zeigt das breite Spektrum möglicher Anwendungen zu Daten der UDM – von der reinen Visualisierung bis hin zur komplexen Datenanalyse. Ein zentrales Learning war die Bedeutung der nutzergerechten Datenaggregation und -aufbereitung. Für unterschiedliche Betrachtungsebenen müssen jeweils passende Datenabstraktionen bereitgestellt werden. Dabei wurde die Rolle der UDM als Datenplattform verdeutlicht: Sie stellt die technische Basis und standardisierte Schnittstellen bereit, die von verschiedensten Anwendungen genutzt werden können.

## 7. Abschließende Betrachtung der Systemarchitektur

In Kapitel 5 wird auf die unterschiedlichen Charakteristiken der zu verarbeitenden Eingangsdaten eingegangen, die schlussendlich entscheidend für die Wahl der Software-Komponenten und damit für die Systemarchitektur der UDM gewesen sind. Im Projektverlauf wurde deutlich, dass sich die Use Cases mit ihren zugrundeliegenden Geodaten nicht immer eindeutig in das 4-Ebenen-Dynamik-Modell der LDM einordnen lassen. So können die zeitlichen Charakteristiken von Phänomenen und deren Erfassung sowie Verarbeitung unterschiedlich sein. Ein Beispiel dafür sind verhältnismäßig hochfrequent einlaufende Sensordaten, die das *beobachtete Phänomen* eines „Schlaglochs“ beschreiben, welches selbst allerdings einer nur niedrigen Änderungsrate über die Zeit unterliegt. Das 4-Ebenen-Dynamik-Modell kann also die Komplexität von Use Cases nicht vollständig abbilden und hatte folglich im Projektverlauf wenig praktische Relevanz. Ein multidimensionaler Ansatz, wie er in Tabelle 5 verfolgt wird, ist vielversprechender. Dort werden die in EDDY betrachteten Use Cases hinsichtlich ihrer zeitlichen Eigenschaften und Datenmengeneigenschaften gegenübergestellt. Da die Tabelle lediglich der Sortierung dient, wird nur eine grobe quantitative Abschätzung zu Frequenzen und Datenmengen vorgenommen.

- Die *Änderung des beobachteten Phänomens* gibt an, wie schnell sich der Beobachtungsge-

genstand, also die *ground truth* ändert und wie häufig der Zustand gemessen und übertragen werden muss. Ändert sich der Zustand nur langsam, so können Informationen vorgehalten werden.

- Die *Reaktion des Verarbeitungssystems* beschreibt, wie häufig dem Nutzer aktuelle Informationen bereitgestellt werden müssen, damit die gewünschte Funktion erfüllt werden kann. Dies bestimmt über den Übertragungsweg und die erforderliche Geschwindigkeit der Datenverarbeitung. Das Verarbeitungssystem schließt hierbei die UDM und das Fahrzeug ein.
- Die *zeitliche Datendichte* wird bestimmt durch die zeitliche Messfrequenz und bestimmt die zu übertragende, zu speichernde und zu verarbeitende Datenmenge.
- Die *räumliche Datendichte* wird bestimmt durch die Dichte der Messpunkte in Abhängigkeit vom Ort. Sie bestimmt – wie die zeitliche Datendichte – über die zu übertragende, die zu speichernde und die zu verarbeitende Datenmenge.

Tabelle 5: Vergleich beobachteter Phänomene in den Use Cases hinsichtlich ihrer Zeit- und Datencharakteristiken

Use Case	Systemanforderungen		Datenanforderungen	
	Änderung des beob. Phänomens	Reaktion Verarbeitungssystem	Zeitliche Datendichte	Räumliche Datendichte
Punktwolken zur Fahrzeug-Lokalisierung	langsam	schnell (Fahrzeug)	niedrig	hoch
Landmarken zur Fahrzeug-Lokalisierung	langsam	schnell (Fahrzeug)	niedrig	niedrig
Erkannte Verkehrsinfrastrukturobjekte	langsam	langsam (UDM)	niedrig	niedrig
Bedarfsgesteuerte Datenerfassung	langsam	langsam (UDM)	niedrig	hoch (z. B. Bild)
Vorverarbeitete Sensordaten	langsam	langsam (UDM)	mittel	mittel
Schutz vulnerabler Verkehrsteilnehmender	schnell (VRU-Position)	schnell (alle Systeme)	hoch	mittel
Aggregierte V2X-/Sensordaten	langsam (Aggregation)	langsam (UDM)	niedrig	niedrig

Tabelle 6 bildet die Use Cases auf die EDDY-Systemarchitektur aus Abbildung 5 ab und fasst die gewählten Übertragungsstandards und deren Implementierungen zusammen.

Tabelle 6: Architekturkomponenten mit gewählten Übertragungsstandards und deren Implementierungen zur Umsetzung der Use Cases

Use Case	EDDY-Architekturkomponente	Übertragungsstandard	Implementierung
Punktwolken zur Fahrzeug-Lokalisierung	Point Cloud Service	FlatBuffers über HTTP	benutzerdefiniert
Landmarken zur Fahrzeug-Lokalisierung	Vector Data Service	OGC – API Features	benutzerdefiniert
Erkannte Verkehrsinfrastrukturobjekte	Vector Data Service	OGC – API Features	benutzerdefiniert
Bedarfsgesteuerte Datenerfassung	Vector Data Service	OGC – API Features	benutzerdefiniert
Vorverarbeitete Sensordaten	Sensor Data Service	OGC SensorThings API	FROST-Server
Schutz vulnerabler Verkehrsteilnehmender	Message Queueing Service	AMQP	RabbitMQ
Aggregierte V2X-/Sensordaten	Grid Map Service	OGC WFS, WMS	GeoServer

## 7.1. Optimierungspotenzial durch Reduzieren der Anzahl technischer Komponenten

Mit aktuellem Entwicklungsstand unterstützt die UDM das Verarbeiten sehr heterogener Geodaten mit Fokus auf dynamische Elemente des Verkehrsraums. Dies resultiert in einer komplexen Systemarchitektur bestehend aus fünf Kernkomponenten: *Vector Data Service*, *Grid Map Service*, *Message Queueing Service*, *Sensor Data Service* und *Point Cloud Service* (siehe Abbildung 5). Aus Perspektive eines IT-Systembetreibers ist die Instandhaltung eines solch heterogenen Systems sehr herausfordernd, denn je mehr unterschiedliche Software-Komponenten betrieben werden müssen, desto höher sind die Kosten und der Ressourcenbedarf. Mit diesem Hintergedanken der Komplexitätsreduktion wird die aufgebaute Systemarchitektur im Folgenden auf Basis der im Projektverlauf gewonnenen Erkenntnisse neu evaluiert. Ziel soll dabei sein, die UDM für einen produktiven Betrieb in Zukunft aus architektonischer Sicht schlanker und somit in betriebswirtschaftlicher Hinsicht attraktiver zu gestalten. Wie die unten stehende Diskussion zeigt, ist es perspektivisch möglich, die bisherigen Datenverarbeitungsmöglichkeiten auch mit vier statt fünf Kernkomponenten beizubehalten und den Eigenentwicklungsteil zu reduzieren.

### 7.1.1. Kombinieren von Vector Data Service und Grid Map Service

Mit der Architekturentscheidung 001 wurde zu Projektbeginn die Eigenentwicklung eines Web-Services auf Basis des Standards OGC API Features stimuliert. API Features definiert in aktueller Standard-Version allerdings nur das *Abfragen* von Daten und somit konnte diese Schnittstelle nicht verwendet werden, um Vektor-Geodaten *in* die UDM zu übertragen. Dies wird erst mit

dem „transaction support“ in Teil 4 *Create, Replace, Update and Delete* der [API-Features-Spezifikation](#) ermöglicht, welcher auch aktuell nur als Entwurf vorliegt. Quelloffenen Software-Bibliotheken als Referenzimplementierung von API Features fehlt daher diese noch nicht standardisierte Transaktionsunterstützung, was der Hauptgrund zur Eigenentwicklung der gesamten *Vector-Data-Service*-Komponente für die UDM gewesen ist. Rückblickend ergeben sich mehrere strategisch attraktivere Optionen als die komplette Entwicklung und Wartung einer eigenen Server-Komponente:

1. *Verwenden von WFS anstelle von API Features*: Der ältere OGC Web Feature Service (WFS) bietet bereits seit mehreren Jahren eine vollstandardisierte Transaktionsunterstützung (WFS-T), welche von zahlreichen quelloffenen Referenzimplementierungen angeboten wird und somit eine Eigenentwicklung obsolet macht. Eine solche Referenzimplementierung stellt bspw. der [GeoServer](#) dar, welcher im späteren Projektverlauf ohnehin als Komponente des *Grid Map Service* in die EDDY-Architektur mit aufgenommen wurde (siehe Architekturentscheidung 010).
2. *Erweitern von GeoServer um Transaktionsunterstützung für API Features*: Zu Projektbeginn ist es nicht der Fall gewesen, aber mittlerweile unterstützt GeoServer neben WFS und WFS-T nativ auch API Features. Zwar fehlt dabei noch die Transaktionsunterstützung (API Features Teil 4), aber anstelle einer eigenen Server-Entwicklung könnte lediglich dieser fehlende Teil dem quelloffenen GeoServer beigesteuert werden. Dies hätte den Vorteil, dass direkt auch andere Projekte und die Open-Source-Community von dieser Erweiterung profitieren würden und man sich weiterhin auf GeoServer als solide Basiskomponente mit allen anderen Vorteilen stützen könnte.
3. *Erweitern anderer quelloffener Referenzimplementierungen von API Features um Transaktionsunterstützung*: Anstelle des GeoServers kann auch die Erweiterung anderer [Referenzimplementierungen von API Features](#) in Erwägung gezogen werden, wie bspw. von *pygeoapi* oder *degree*, mit den zuvor genannten Synergieeffekten.

## 7.2. Optimierungspotenzial durch Weiterentwicklung des Point Cloud Service

In der aktuellen Implementierung des *Point Cloud Service* werden immer vollständige Punktwolkendatensätze zum Server übertragen, was für den Entwicklungsfall und im prototypischen Projektkontext mit wenigen Sendern noch als echtzeitfähig angesehen werden kann. Diese Lösung wird allerdings an ihre Leistungsgrenzen stoßen, sobald durch verteilte Sender mehrere Datensätze gleichzeitig an den Server übertragen werden. Einerseits müsste die Größe der jeweils übertragenen Daten weiter reduziert werden und andererseits gilt es, die Integration der einzelnen Snapshots zur Gesamtpunktwolke auf Server-Seite zu optimieren. Hierfür erscheinen die in [15] vorgestellten Konzepte zum selektiven Update von Punktwolken durch Crowd-Sourcing als aussichtsreich.

Das Projekt-Dashboard, welches im Kapitel 6 beschrieben wird, beinhaltet eine Visualisierungslösung von Punktwolken direkt im Browser. Die Performance dieser Visualisierungslösung kann zukünftig weiter verbessert werden, wenn anstelle des ROS-basierten Punktwolkenformats

zum Abrufen der Daten vom Server das Format Cloud-Optimised Point Cloud (COPC) verwendet wird, siehe Architekturentscheidung 009. Dieses ermöglicht indiziertes Abrufen hochauflöser und großräumiger Punktwolkendaten direkt über die Browser-native HTTP-Schnittstelle. Intern verwendet COPC dafür ein Octree-basiertes Tiling von Daten.

### 7.3. Potenzial zur Verarbeitung von Wetterdaten über Grid Map Service

Mit Architekturentscheidung 003 wurde zu Projektbeginn rasdaman als Software-Komponente zum Zwischenspeichern von DWD-Regenradardaten in der UDM gewählt (siehe auch User Story 4.3 in Anhang B.13). Im Projektverlauf hat sich herausgestellt, dass die Konfiguration von rasdaman trotz umfangreichen Online-Materials nicht trivial ist und schlussendlich nicht erfolgreich durchgeführt werden konnte.

Das Projekt-Dashboard, welches im Kapitel 6 beschrieben wird, beinhaltet eine Visualisierungslösung dieser Regenradardaten direkt im Browser, die aber noch nicht auf der finalen UDM-Architektur basiert. Architekturentscheidung 010 ersetzt 003, wodurch der ebenfalls in *Grid Map Service* verwendete GeoServer zum Bereitstellen von Daten über den Web Coverage Service (WCS) aus der UDM heraus verwendet werden kann. Für das Einspielen der Regenradardaten in die UDM wurde ein Konzept entwickelt, welches auf Apache Flink basiert, siehe Abbildung 34. Dabei werden die sich alle 5 min aktualisierenden DWD-Regenradardaten als herkömmlicher Datenstrom angesehen, entsprechend von Flink über die WCS-Schnittstelle des DWD abgerufen und in den Datenspeicher des GeoServer geschrieben. Von dort sind sie dann ohne weitere Entwicklung ebenfalls über WCS direkt abrufbar. Apache Flink ersetzt also gänzlich die transaktionelle Übertragung in die UDM und macht den WCS-T von rasdaman somit obsolet, was allerdings die Entwicklung eines entsprechenden Flink-Jobs voraussetzt. Die Umsetzung dieses Konzeptes steht noch aus.

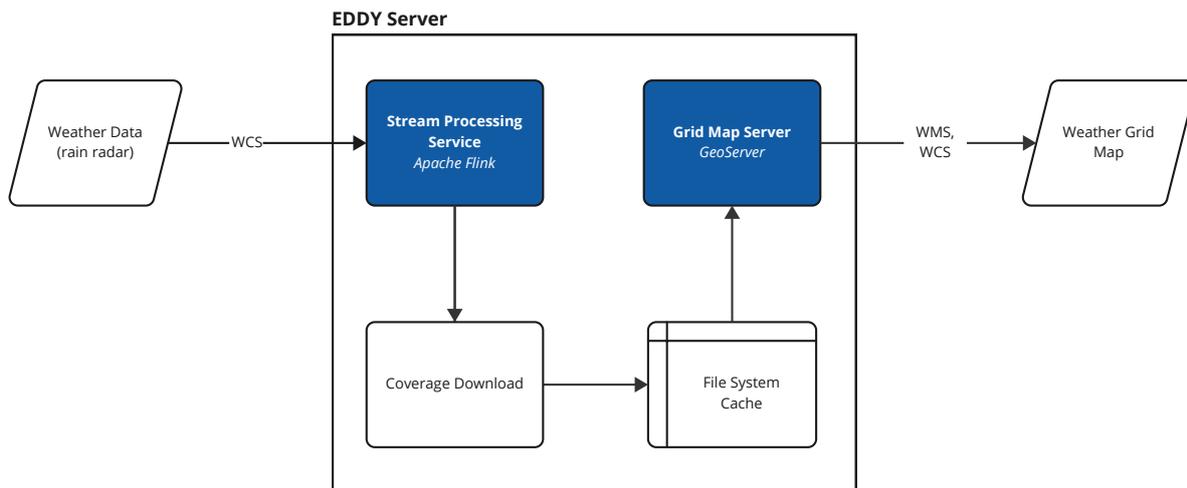


Abbildung 34: Architektur für Regenradardaten

## 8. Handlungsempfehlungen

In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse, die im Projektverlauf gewonnen wurden, sowohl durch die technische Umsetzung als auch durch Gespräche, die im Projektkontext geführt wurden, zusammengefasst und in Form von Handlungsempfehlungen formuliert. Die Abschnitte 8.3, 8.7 und 8.9 stützen sich dabei insbesondere auf die Ergebnisse der Studie, die fürs Projekt vom Partners IKEM [16] durchgeführt wurde.

Um die in Kapitel 2 skizzierte Vollintegration der UDM mit hoher Datenqualität zu erreichen, ist eine große Anzahl an Nutzern erforderlich, die über geeignete Sensorik verfügen und bereit sind, ihre Daten zu teilen. Mittelfristig ist nicht davon auszugehen, dass ein hoher Vernetzungsgrad zu erreichen ist. Dagegen spricht unter anderem eine bislang fehlende Standardisierung zum Einsatz einer UDM oder eines vergleichbaren Systems. Für Fahrzeughersteller und Dienstleister steht dann der Entwicklungsaufwand unter Umständen einem geringen oder lokal begrenzten Nutzen gegenüber.

Die Handlungsempfehlungen gliedern sich daher in zwei Kategorien, solche die auf eine längerfristige Marktdurchdringung hinwirken und solche die sich auf ein Umfeld geringer Durchdringung oder lokal begrenzter Verwendung beziehen. Durch den modularen Aufbau der UDM besteht die Möglichkeit, auch kurzfristig Komponenten zu implementieren und Use Cases umzusetzen, die in letzterem Fall bereits einen Mehrwert generieren können.

### 8.1. Handlungsempfehlung 1: Einbeziehen von Fahrzeugherstellern

Für eine umfassende Marktdurchdringung ist es essentiell, eine Beteiligung der großen Automobilhersteller und Zulieferer zu erwirken, mit dem Ziel eine Verbindung zur UDM serienmäßig zu integrieren. Alternativen wie Nachrüstlösungen würden zu geringeren Nutzerzahlen führen und könnten nicht das volle Potential der Bordsensorik ausschöpfen. Über welchen Hebel dies gelingen kann, ist zur Zeit noch unklar. Das Interesse der Automobilindustrie an einer UDM ist vorhanden, das Commitment bleibt aber bislang aus. Zum einen bestehen Hürden, die im Folgenden beschrieben werden. Zum anderen arbeiten viele Hersteller an eigenen Mobilitätsdatenplattformen, die sie gerne vermarkten würden.

Das fehlende Commitment hat zwei Wurzeln. Die erste liegt im fehlenden Angebot. Es gibt keine einheitliche, flächendeckende und engmaschige Datenbereitstellung über eine UDM durch die öffentliche Hand. Die zweite Wurzel findet sich in den rechtlichen Rahmenbedingungen, die letztlich dazu führen, dass aus Sicht der Fahrzeughersteller keine verlässlichen Daten von der UDM bereitgestellt werden.

### 8.2. Handlungsempfehlung 2: Beteiligung an Harmonisierung

Um die Daten und Schnittstellen flächendeckend und einheitlich anbieten zu können, muss eine Harmonisierung und Standardisierung stattfinden. Sowohl bezüglich der angebotenen Daten, deren Beschreibung, ihrer Qualität und der zugehörigen Schnittstelle. Zu den verschiedenen Aspekten gibt es bereits unterschiedlichste Harmonisierungsbestrebungen, bislang aber keine die diese unter dem Dach einer UDM oder eines ähnlichen Systems zusammenfassen. Hier müsste angesetzt

werden. Entsprechende Bemühungen sollten aus oben genannten Gründen die Fahrzeughersteller einbeziehen. Bleiben sie außen vor, besteht das Risiko, dass die Daten der UDM in den Fahrzeugen keine Verwendung finden.

Städtische und kommunale Stakeholder sollten sich an dem Austausch beteiligen um das in der Einleitung skizzierte Ziel der Datenhoheit über die Infrastruktur erreichen zu können. Um der Anforderung einer flächendeckenden UDM gerecht zu werden, müssen sie aber im nationalen, besser noch europaweiten Verbund auftreten. Eine einzelne Stadt kann Impulse liefern und Teststrecken bereitstellen, hat aber gegenüber den Fahrzeugherstellern nicht das erforderliche Marktgewicht. Um einen einheitlichen Zugriffspunkt für die Daten zu haben, sollte die Einbeziehung nationaler und internationaler Datenräume geprüft werden, allen voran der National Access Points. Angesichts Bemühungen, diese zu harmonisieren ([NAPCORE](#)) zeichnen sich am Horizont bessere Erfolgchancen für Dienste wie eine UDM ab.

### **8.3. Handlungsempfehlung 3: Anpassen der rechtlichen Rahmenbedingungen**

Die Verlässlichkeit individueller Datensätze bleibt auch im Szenario eines vollständig harmonisierten Datenaustauschs eine Herausforderung. Es fehlt das Äquivalent eines Produkthaftungsgesetzes für Daten oder vergleichbarer rechtlicher Instrumente, die die Richtigkeit von Daten über bilaterale Vertragsverhältnisse hinaus zu garantieren vermögen. Die Verantwortung für den sicheren Betrieb automatisierter Fahrfunktionen liegt in den Händen der Fahrzeugherstellenden, -haltenden und -betreibenden mit einer Schlüsselstellung der Herstellenden. Sie sind also darauf angewiesen, fehlerfreie Datensätze zu verwenden. Beziehen diese fahrzeugnahen Akteure Daten privater Dritter zur Absicherung der Fahrfunktion ein, kann bilateral die Richtigkeit der Daten mit entsprechender Haftungsverlagerung vertraglich abgesichert werden. Solche vertraglichen Absicherungen in Mehrpersonenverhältnissen haben ihre eigenen Herausforderungen, so dass noch unklar ist, wie sich hier die Praxis entwickeln wird. Für den öffentlichen Betreibenden einer UDM, ergeben sich aber weitere Hürden die Haftung für die bereitgestellten Daten zu übernehmen. Für kostenlose Angebote ist die Haftungsübernahme ohne neue Rechtsgrundlage bereits aus haushaltsrechtlichen Gründen ausgeschlossen. Kostenpflichtige Angebote bedürften noch weitergehender Regelung.

Es kann nicht garantiert werden, dass immer und überall alle benötigten Daten zur Verfügung stehen, zum Beispiel in abgelegenen Gebieten, in denen wenige Nutzende unterwegs sind. Aus Sicht der Fahrzeugherstellenden sind die Daten damit nicht verlässlich und können nicht für sicherheitskritische Fahrfunktionen verwendet werden. Insbesondere im Betriebserlaubnisverfahren werden externe Daten für sicherheitskritische Systeme zum Problem. Die bestehenden Regelungen sind hier noch sehr vage und falls solche externen Daten einbezogen werden, müsste zum Zeitpunkt der Genehmigung die Datenart, -quelle und -qualität dokumentiert und nachprüfbar sein, damit die Genehmigungsbehörde die Sicherheit der Fahrfunktion bewerten kann.

Nach geltendem Recht ist die staatliche Haftungsübernahmen für Daten einer UDM also nicht möglich. Dem Gesetzgebenden steht es jedoch offen, eine Rechtsgrundlage für eine entsprechende Haftungsübernahme zu schaffen. Eine Staatshaftung für fehlerhafte Verkehrszeichen (z. B. für feindliches Grün) erscheint heutzutage selbstverständlich, obwohl sie bei Licht betrachtet

die kostenlose Übernahme eines allgemeinen Lebensrisikos der betroffenen Verkehrsteilnehmenden durch den Staat darstellt, die auf eigene Gefahr eine kostenlose staatliche Leistung (die Lichtsignalanlage) in Anspruch nehmen. Jedoch hat nicht zuletzt diese strikte staatliche Haftung zu heute nahezu unfehlbaren Lichtsignalanlagen geführt. Ein vergleichbarer Treiber der technischen Entwicklung könnte auch eine mutige staatliche Haltung zur Haftungsübernahme für digitale Verkehrsdaten werden. Gleichwohl soll hier eine Gesetzesänderung in diesem Sinne nicht empfohlen werden. Zwar könnten externe Daten aus einer UDM autonome Fahrfunktionen sicherer und performanter machen. Nicht zuletzt der Crowd-Sourcing-Ansatz bei der Datenerhebung kann hinsichtlich fehlerhafter Daten jedoch ein unüberschaubares Risiko darstellen. Es bedarf daher noch weitere Forschung und Diskussion, um das Kosten-Nutzenverhältnis einer solchen Haftungsübernahme besser zu verstehen.

#### **8.4. Handlungsempfehlung 4: Entwicklung entlang von Use Cases**

In Experteninterviews und Stakeholdergesprächen ist klar geworden (siehe Abschnitt 3), dass die Formulierung quantifizierbarer Anforderungen zur Zeit noch schwer fällt. Es empfiehlt sich daher, die Entwicklung einer UDM entlang von Use Cases fortzuführen. Bei deren Implementierung können Anforderungen konkretisiert werden. Hier kann auch die Rolle von Städten und Kommunen bei der Weiterentwicklung liegen: als Bereitsteller von Teststrecken, Testfeldern und unterstützender Infrastruktur.

#### **8.5. Handlungsempfehlung 5: Fokus auf ausgewählte Use Cases**

Angesichts der oben genannten Herausforderungen scheint die Vision einer vollintegrierten UDM (siehe Abschnitt 2) noch fern. Eine Stadt wie die Freie und Hansestadt Hamburg sollte seine Bemühungen in diese Richtungen daher dosiert und zielgerichtet einsetzen. Wie Eingangs des Kapitels erwähnt, gibt es auch in einem Umfeld geringer und lokaler Durchdringung Use Cases, die für viele Stakeholder einen signifikanten Mehrwert bieten können, insbesondere auch für einen städtischen Betreiber selbst. Zum jetzigen Zeitpunkt empfiehlt es sich für diesen daher, sich auf solche zu fokussieren. Die Erfahrungen die dabei auf allen Seiten gesammelt werden, können wiederum wertvolle Impulse zur Harmonisierung liefern.

Zu diesen Use Cases gehört beispielsweise die *Bedarfsgesteuerte Datenerfassung* aus Abschnitt 5.3. Die Einsatzmöglichkeiten sind hier extrem vielfältig und reichen von der Planung von Baumaßnahmen über die Verknüpfung mit dem [Melde-Michel](#) bis hin zur Begutachtung von Unfallschauplätzen. Oft sind die angefragten Daten nicht zeitkritisch, sodass eine geringe Anzahl unterstützender Fahrzeuge ausreichend sein kann. Die *Erkennung und Lokalisierung von Verkehrsinfrastrukturobjekten* (Abschnitt 5.2) liefert schon mit den untersuchten Beispielen *Verkehrsschilder* und *Baustellenbaken* einen großen Mehrwert und lässt sich mit neuen Objektklassen sehr gut auf dem Weg zum semantischen 3D-Stadtmodell erweitern. Verwendungsmöglichkeiten der Daten aus der *kontinuierlichen sensorgestützten Datenerfassung* wurden schon in Abschnitt 5.4 aufgezeigt. Auch hier reicht oft schon eine geringe Updatefrequenz bei löchriger Abdeckung aus, um fundierte Aussagen treffen zu können.

## **8.6. Handlungsempfehlung 6: Nutzung stadteigener Fahrzeugflotten**

In dem Szenario ohne rechtlich verlässliche Daten ist nicht mit einer umfassenden Beteiligung der Fahrzeughersteller über Serienfahrzeuge zu rechnen. Als primärer Datenlieferant müssen daher andere Nutzergruppen akquiriert werden. Insbesondere stadteigene Fahrzeugflotten, wie zum Beispiel Busse, Shuttles oder Fahrzeuge der Stadtreinigung bieten sich an, da dann nicht zwingend ein Mehrwert auf Fahrzeugseite geschaffen werden muss. Es empfiehlt sich außerdem, auf potentiell größere Flotten zu setzen, damit die Integration im Laufe der Zeit skaliert werden kann. Die Flotten weisen unterschiedliche Charakteristika bezüglich Abdeckung und Frequenz auf, die nach Möglichkeit zu den gewünschten Use Cases passen sollten.

Busflotten können auf vielen Linien mit einer Frequenz von mehrmals pro Stunde Aktualisierungen liefern und haben insgesamt einen sehr hohen Abdeckungsgrad, wenn auch einige Straßen nie angefahren werden. Sie eignen sich daher am besten für Use Cases, die nicht von vollständigen Datensätzen abhängen aber von der hohen Aktualisierungsfrequenz profitieren, wie die bedarfsgesteuerte Datenerfassung (siehe Abschnitt 5.3). Shuttles bieten einen noch höheren Abdeckungsgrad zu Lasten einer unvorhersehbaren Frequenz und sind damit zur Pflege von nicht verbindlichen Katalogdatensätzen bestens geeignet, wie zum Beispiel der Erfassung von Baustellenbaken (siehe Abschnitt 5.2.1). Die Fahrzeuge der Stadtreinigung fahren bis auf ganz wenige Ausnahmen das gesamte Stadtgebiet ab, bieten dafür aber nur eine geringe Aktualisierungsfrequenz. Sie könnten für die Erfassung von sich langsam ändernden Katasterdatensätzen eingesetzt werden, wie zum Beispiel Verkehrsschildern (siehe Abschnitt 5.1.2).

In einem Einführungszenario ist davon auszugehen, dass zunächst nur Flottenteile mit geeigneter Sensor- und Kommunikationstechnik ausgestattet werden. In allen eben skizzierten Anwendungsbereichen können sie dennoch zu einem Mehrwert beitragen und bei der Datenerfassung unterstützen.

## **8.7. Handlungsempfehlung 7: Sondernutzungserlaubnis als Anreiz zur Datenbereitstellung**

Wenn sich nicht ausschließlich auf stadteigene Fahrzeuge verlassen werden soll, kann auch durch einen monetären Ausgleich ein Anreiz für externe Dienstleister geschaffen werden, Daten an die UDM zu liefern. Ein alternativer Ansatz kann sein, das Erteilen von Sondernutzungserlaubnissen als Instrument zu nutzen und an die Bereitstellung von Daten zu koppeln. Für viele Vorhaben ist aktuell schon eine Sondernutzungserlaubnis erforderlich und könnte mit entsprechenden Bedingungen verknüpft werden. Für den Betrieb von Kleinstfahrzeuge wie zum Beispiel E-Scootern wird aktuell keine Sondernutzungserlaubnis benötigt. Der Landesgesetzgeber hat aber die Möglichkeit, das Straßen- und Wegerecht entsprechend zu ändern.

## **8.8. Handlungsempfehlung 8: Zur Nutzung der Urban Data Platform**

Die Freie und Hansestadt Hamburg (FHH) betreut mit der UDP eine umfangreiche Datenplattform, die die Aufgabe hat, städtische Daten der Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Die Ausführungen hier beziehen sich auf das Zusammenspiel von UDM und dieser Plattform und

sind nur bedingt übertragbar.

Wenn auch die UDP viele der Schnittstellen anbietet, die von der UDM genutzt werden, ist die Architektur der UDP bislang nicht darauf ausgelegt, die komplexen Datenverarbeitungs- und -transformationsprozesse der UDM (siehe zum Beispiel Architekturentscheidung 008) zu integrieren. Das Prinzip der UDM sieht außerdem vor, dass eine Vielzahl authentifizierter Nutzer die Möglichkeit hat, die Datensätze zu aktualisieren. Bei der UDP ist dieses Recht lediglich den Eignern der Datensätze vorbehalten. Für einige der UDM-Komponenten, wie die Bereitstellung von V2X-Nachrichten über einen RabbitMQ-Broker (Abschnitt 5.5) und von LiDAR-Punktwolken (Abschnitt 5.1.1), gibt es auf der UDP ebenfalls kein Äquivalent.

Die UDM sollte daher mittelfristig als eigenständiges System weiterentwickelt werden. Im Betrieb können und sollten aber geeignete Datensätze auf der UDP publiziert werden. Das betrifft die aggregierten Datensätze aus Abschnitt 5.7.1 sowie die objektorientierten Datensätze, wie sie in den Abschnitten 5.1.2 und 5.2.1 bearbeitet werden. Aufgrund der identischen Schnittstellen ist das technisch unkompliziert. Die UDM tritt dann auf der UDP als Dateneigner in Erscheinung.

Perspektivisch könnte die UDM zumindest in Teilen als Komponente der UDP angelegt werden. Ob die damit einhergehenden organisatorischen Verantwortlichkeiten im Sinne der FHH sind, gilt es zu prüfen.

## 8.9. Handlungsempfehlung 9: Zum Umgang mit Datenschutz

Aktuelle Ereignisse, wie das Datenleck des Automobilherstellers VW, bei dem Bewegungsdaten von tausenden E-Autos ungeschützt einsehbar waren, zeigen auf, welche Relevanz das Thema Datenschutz beim Umgang mit Standort- und Mobilitätsdaten hat (siehe 38C3-Konferenzbeitrag [Wir wissen wo dein Auto steht](#)).

Der Projektpartner IKEM hat eine Studie zum Thema „Rechtsfragen der Datenökonomie – Empfehlungen aus der Stakeholderperspektive“ angefertigt, in dem auch datenschutzrechtliche Fragestellungen untersucht wurden. In der Studie werden Karten und Systeme mit hochauflösenden, dynamischen Daten, wie die UDM, rechtlich eingeordnet. Die Studie ist in Gänze unter anderem auf der Webseite von IKEM zu finden [16].

Betreibende eines Systems wie der UDM, müssen für die Einhaltung der rechtlichen Anforderungen Sorge tragen, dazu gehören die Grundrechte von Verkehrsteilnehmenden, die Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) und Informationsauskunftsrechte.

Werden Nachrichten erfasst und verarbeitet, müssen datenschutzrechtliche Vorgaben beachtet werden. Dabei ergeben sich für die UDM zwei Herausforderungen. Zum einen werden beim Einsatz von Fahrzeugen mit Kamerasystemen nicht nur abstrakte Objekte erfasst und extrahiert, sondern auch personenbezogene Daten wie Gesichter und Kennzeichen aufgenommen. Zum anderen kann zu den grundsätzlich mindestens pseudonymisierten Daten, die Nutzende der UDM bereitstellen, nachträglich ein Personenbezug hergestellt werden, wenn die Geoposition der bereitgestellten Daten mit weiteren externen Informationen abgeglichen wird. In der Umsetzung der Use Cases wurden Maßnahmen zum Datenschutz diskutiert. Dazu gehören Mechanismen, die **Datenschutz by Design** bewirken, beispielsweise die In-Line-Anonymisierung von Kamerabilddern, sprich Anonymisierung bereits auf dem Fahrzeug bevor die Daten an Server übertragen

werden, oder Maßnahmen, wie sie für die V2X Server-Kommunikation erörtert wurden (siehe 5.5.4). Ein weiterer Mechanismus ist **Anonymisierung durch Aggregation**: Einzelmessungen werden gar nicht gespeichert, sondern direkt aggregiert und dann verworfen. Werden Einzelmessungen für die weitere Verarbeitung zumindest vorübergehend benötigt, können **Closed-Loop-Systeme** verwendet werden, in denen Einzelmessungen zwar verarbeitet aber nicht abgerufen werden können (siehe Abschnitt 5.7.1). Es ist zu prüfen, ob durch solche Maßnahmen die Anwendbarkeit der DSGVO umgangen werden kann. Ist dies nicht möglich, muss die Zustimmung der Nutzenden zur Datenverarbeitung eingeholt werden, was unter Umständen Einschränkung hinsichtlich der Flexibilität der Use Cases mit sich bringt. Im Rahmen von EDDY wurde auf die Erstellung eines Datenschutzkonzeptes verzichtet. Bei einer Fortführung der Projektinhalte aus EDDY und einem langfristigen Betrieb der UDM ist ein Datenschutzkonzept aufzusetzen. Dieses kann die untersuchten Maßnahmen zur Einhaltung der datenschutzrechtlichen Vorgaben beinhalten.

## 8.10. Handlungsempfehlung 10: Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit

Eine quantitative Wirtschaftlichkeitsanalyse übersteigt den Rahmen des Projekts und ist angesichts einer großen Zahl an Unbekannten zur jetzigen Zeit auch nur schwer möglich. Daher werden an dieser Stelle auf Basis der Erfahrungen im Projekt lediglich qualitative Hinweise gegeben, welche Faktoren zu berücksichtigen sind. Es wird außerdem lediglich die Perspektive eines städtischen Betreibers eingenommen, der gleichzeitig über Use Cases wie der *bedarfsgesteuerten Datenerfassung* Nutzer der UDM ist. Für alle anderen Nutzer und gesamtgesellschaftlich ergeben sich Mehrwerte durch mehr Sicherheit, besseren Verkehrsfluss und geringeren Schadstoffausstoß.

Den Kosten für die Implementierung und den Betrieb einer UDM stehen Einsparpotentiale und Nutzen gegenüber. Die Einsparpotentiale beim öffentlichen Betreiber ergeben sich in erster Linie durch die Möglichkeit auf alternative Techniken und Prozesse zur Datenbereitstellung oder Datenakquise verzichten zu können. So kann zum Beispiel die Erfassung von Baustellenbaken durch Fahrzeuge ein System auf Basis von GNSS-lokaliserten Baken ersetzen. An anderer Stelle können aggregierte V2X-Nachrichten den Zukauf von Floating Car Data (FCD) überflüssig machen. Für weitere Anhaltspunkte zu Einsparpotentialen und Nutzen sei auch auf das Kapitel 2 verwiesen.

Der Aufwand zur Bereitstellung einer UDM befindet sich im Wesentlichen in der Entwicklung. In diesem Projekt wurde bereits gute Vorarbeit geleistet, für einen Einsatz im Betrieb fehlen allerdings noch Komponenten wie zentrale Authentifizierungs- und Sicherheitsmechanismen. Im Projekt konnte am Beispiel der Datenaggregation über Apache Flink gezeigt werden, dass sich die UDM-Komponenten mit überschaubarem Aufwand aus der Entwicklungsumgebung auf das Produktivsystem des Betreibers übertragen lassen, entsprechende technische Fähigkeiten beim Betreiber vorausgesetzt.

Zur Einbindung von Use Cases ist mit weiteren Aufwänden zur Implementierung der Schnittstellen auf Seiten der Datenbereitsteller und -abnehmer zu rechnen. Die in EDDY entwickelte UDM benutzt soweit wie möglich standardisierte Schnittstellen und Datenformate, was den Prozess erleichtert. Diese Aufwände fallen nicht zwingend bei der Betreiberstadt an. Es ist aber da-

von auszugehen, dass mitunter umfangreicher Support zu leisten ist. So zeigt die Erfahrung, dass bereits geringe Unterschiede in der Version oder Interpretation eines Standards, den Koordinatensystemen oder der Zeitsynchronisationen zu erheblichen Komplikationen führen können. Im Use Case V2X-Kommunikation zum Schutz vulnerabler Verkehrsteilnehmender (Abschnitt 5.6) musste beispielsweise vom Projektteam eine spezifische Softwarekomponente entwickelt werden, um die nicht standardkonforme Verwendung der CAM bei einem externen Dienstleister zu überbrücken. Gerade in einem dynamischen Umfeld, in dem Standards fortlaufend weiterentwickelt werden, ist mit ähnlichen Situationen häufig zu rechnen.

Um das in der Vision skizzierte volle Potential der UDM zu realisieren, sind für die betreibende Stadt darüber hinaus erhebliche Investitionen in interne strukturelle Veränderungen erforderlich: Verantwortliche in Behörden, Bezirken und städtischen Unternehmen müssen überzeugt, Use Cases entwickelt, Prozesse etabliert und Nutzer geschult werden. Diese sind schwer zu quantifizieren und gehen letztlich mit einer grundlegenden Transformation der digitalen Infrastruktur und Zusammenarbeit einher.

### **8.11. Handlungsempfehlung 11: Prüfen von alternativen privaten Angeboten**

Als Alternative zum Aufbau eines eigenen Systems sollten Städte prüfen, ob das Verhältnis von Kosten zu Nutzen bei ähnlichen Systemen von privaten Anbietern günstiger ist. Viele Fahrzeughersteller (z. B. Mercedes Benz), Zulieferer (z. B. Bridgestone, ZF) und Dienstleister (z. B. Here) aus der Mobilitätsbranche und darüber hinaus (z. B. Vodafone) arbeiten zur Zeit an dem Aufbau von Mobilitätsdatenplattformen, über die sie aufbereitete Daten von eigenen oder kooperierenden Fahrzeugen vermarkten möchten. Da hinter diesen Angeboten mitunter große Fahrzeugflotten stehen, stellt sich dort nicht das Problem der fehlenden Datengrundlage, mit der sich ein öffentlicher Betreiber konfrontiert sieht.

Dem Eindruck aus diversen Gesprächen im Projektverlauf nach, sind diese Angebote aktuell noch nicht ganz ausgereift und viele Fragen, zum Beispiel zur standardisierten Erfassung und Bereitstellung der Daten auch dort noch ungeklärt. Aufgrund der Vielzahl an Angeboten ist außerdem davon auszugehen, dass der Markt sich in den nächsten Jahren konsolidieren wird. Von dem Abschluss umfangreicher oder langfristiger Verträge sei daher vorerst abgeraten.

Die Plattformen decken meist auch nur einen Teil der Use Cases ab, die mit der UDM verfolgt wurden. Die Aufbereitung von Fahrzeugbewegungsdaten und die Erfassung des Straßenzustands sind allerdings prominent vertreten.

Es gilt auch zu bedenken, dass aufgrund des Fokus auf die eigenen Fahrzeugflotten, diesen Plattformen keine Stichprobe des Gesamtverkehrs zu Grunde liegt und mit Biases in den Daten zu rechnen ist, die mitunter zu verzerrten Abbildungen oder Fehlinterpretationen führen können.

Ebenso kann bei der Nutzung von privaten Angeboten der Idee, die (Daten-)Hoheit über die Infrastruktur zu behalten, nur bedingt Rechnung getragen werden. Insbesondere wenn man berücksichtigt, dass unter Umständen Interessenskonflikte zwischen dem Plattformanbieter mit seinen Flottenfahrzeugen und der Allgemeinheit vorliegen.

Kooperationen zwischen einem öffentlichen Betreiber und anderen Plattformen könnten der goldene Mittelweg sein: Die private Plattform liefert die Daten, aber die Interpretation, Auf-

bereitung und Bereitstellung obliegt dem öffentlichen Betreiber. Bei mehreren solchen Kooperationen kann dann auch den oben genannten Problemen mit Bias und Interessenskonflikten begegnet werden. Bei solch einer Integration von Daten unterschiedlicher Lieferanten bekommt die Harmonisierung von Schnittstellen und Datenformaten erneut einen hohen Stellenwert, um individuelle Anpassungsaufwände auf öffentlicher Betreiberseite möglichst zu vermeiden (siehe Abschnitt 8.2).

## **8.12. Handlungsempfehlung 12: Sicherstellen einer Zeitsynchronisierung für Eingangsdaten zur serverseitigen Datenverarbeitung**

Im Gegensatz zur ITS-standardisierten V2X-Direktkommunikation, die aufgrund ihrer systemischen Umsetzung räumlich und zeitlich beschränkt arbeitet und daher mit relativen, kürzer gültigen Zeitstempeln in den Daten auskommt, ist im Projektverlauf von EDDY deutlich geworden, dass für die anvisierte V2X-Backend-Kommunikation eine absolute Zeitsynchronisierung für die zielführende Verarbeitung von Nachrichten notwendig ist (siehe Abschnitt 5.7.3). Diese Erkenntnis lässt sich zur allgemeinen Empfehlung generalisieren, dass alle im Feld akquirierten dynamischen Daten bereits vorzeitig auf Senderseite mit einem absoluten Zeitstempel zu versehen sind, bevor sie über eine Internet-Schnittstelle zur weiteren Verarbeitung übertragen werden. Ansonsten ist das Ableiten aussagekräftiger Erkenntnisse aus raum-zeitlichen Analysen nicht oder nur erschwert möglich.

## **9. Zusammenfassung und Ausblick**

Wie schon in der Einleitung geschrieben und in der Vision skizziert, hatte sich EDDY das Ziel gesetzt, Domänengrenzen aufzulösen: automatisierte und vernetzte Fahrzeuge können sich im Kollektiv gegenseitig mit Daten versorgen und als mobile Sensoreinheiten zur Erstellung eines digitalen Mobilitätszwillings beitragen, der in unterschiedlichsten Bereichen der Verkehrsplanung, -Steuerung und -Gestaltung zu Verbesserungen und neuen Möglichkeiten führen kann. Im Zuge dessen hat sich auch das Verständnis des namensgebenden Begriffs *Karte* geändert. Die Anforderungen der verschiedenen Anwendungsfelder sind zu unterschiedlich, als dass ein homogenes Datenmodell diesen gerecht werden könnte. Die UDM hat sich daher zu einer Datenplattform gewandelt. Sie unterscheidet sich von anderen Plattformen in dem Sinne, dass Daten nicht nur aufgespielt und abgerufen werden können, sondern auf der Plattform selbst bearbeitet, transformiert und fusioniert werden, und so in geeigneter Form unterschiedlichsten Anwendungsfällen zugänglich gemacht werden können. In dem hier untersuchten Umfang und über Domänengrenzen hinweg ist das eine Neuerung. Im Projektverlauf hat sich gezeigt, dass das ein überaus komplexes Unterfangen ist und es für die Datenverarbeitung auf der UDM kein Universalrezept gibt. Einige der angedachten Funktionen konnten daher nicht voll entwickelt werden, beispielsweise wurde die für einen skalierten Einsatz essentielle Datenfusion nur konzeptionell behandelt. Des Weiteren fehlen Sicherheitsfeatures, wie Anschluss an die Public Key Infrastruktur (PKI, während der Projektlaufzeit zunächst nicht verfügbar), vollständige Datenschutzmechanismen und Zugriffsrechtmanagement.

Da die Datentransformationsschritte Use-Case-spezifisch sein können, folgt auch dass trotz der modularen Anlage der UDM, die Integration von zusätzlichen Use Cases nicht trivial ist. Im Projekt wurde allerdings ein breites Spektrum an Anwendungsfällen abgedeckt, gerade auch hinsichtlich der technischen Handhabe. Die im Projekt entwickelte Architektur liefert daher ein flexibles und leistungsfähiges Grundgerüst und viele der Prozesse lassen sich mit geringfügigen Änderungen übertragen. Die analoge Aggregation von V2X-Daten und Fahrrad/Scooter-Sensordaten über Apache-Flink demonstriert das eindrucksvoll.

Schwierigkeiten bei der Integration treten insbesondere dann auf, wenn in der Verarbeitungskette zwischen Datenbereiter und Abnehmer Daten nicht standardkonform behandelt werden. Auf Seiten der UDM sind dann zusätzliche Transformationsschritte erforderlich, was im Betrieb erhebliche Ressourcen binden kann.

Bei der hier im Projekt gefundenen technischen Realisierung des Konzept einer UDM, muss es sich nicht zwingend um die einzige valide Lösung handeln. Die im Anhang aufgeführten Architecture Decision Records belegen die fundierte Lösungsfindung. Zusätzliche Anforderungen oder eine andere Bewertung können zu einem anderem Ergebnis führen. Viele der Erkenntnisse besitzen dennoch Allgemeingültigkeit.

Gespräche mit der Automobilindustrie haben gezeigt, dass Interesse an verlässlichen Daten besteht. Verlässlichkeit geht aufgrund der regulatorischen Rahmenbedingungen mit einer Haftungsübernahme für die Daten einher, die ein kommunaler Betreiber nicht erfüllen kann. Die Motivation für Fahrzeughersteller und Zulieferer als tragender Stakeholder der UDM in Erscheinung zu treten ist also gering. Wie die UDM dennoch einen Mehrwert für die Allgemeinheit bieten kann, wurde in den Handlungsempfehlungen in Kapitel 8 erörtert. Damit kann auch das ambitionierte Ziel durch ein System wie die UDM, die Datenhoheit über die eigene Infrastruktur zu manifestieren, nicht vollumfänglich erreicht werden. Ohne die unmittelbare digitale Einflussnahme auf große Fahrzeugflotten beschränken sich die Möglichkeiten der Verkehrssteuerung auf die etablierten Maßnahmen.

Für den langfristigen Erfolg einer UDM muss der Nutzen der Anwendungsfälle den Kosten der Implementierung und des Betriebs gegenübergestellt werden. Dies muss auf einer Ebene individueller Stakeholder(gruppen) analysiert werden, da die einzelnen Interessen und Motivatoren spezifischen Aufwänden gegenüberstehen. Für die Perspektive eines kommunalen Betreibers wurden schon Hinweise dazu in Handlungsempfehlung 8.10 gegeben. Für Folgeprojekte empfiehlt es sich darauf aufbauend ein vollständiges Betriebskonzept auszuarbeiten, dass die weiteren wesentlichen Stakeholder berücksichtigt.

Auf Ebene der Use Cases wurden bedeutende Fortschritte erzielt. Eine technische Realisierung der gezeigten Anwendungen in höheren Technologiereifegraden erscheint machbar, sodass sich die UDM mittelfristig in den Betrieb überführen ließe.

In EDDY wurde sich im Projektverlauf bewusst entschieden, keine App zu entwickeln die Endnutzern einen direkten, vollständigen Zugriff auf die UDM ermöglicht. In dem Sinne gibt es keine EDDY-App. Die Architektur der UDM wurde so angelegt, dass über standardisierte Schnittstellen Daten anwendungsspezifisch abgerufen und in Drittanwendungen für konkrete Aufgaben aufbereitet werden können. Im Projekt wurden exemplarisch mehrere solcher Drittanwendungen entwickelt (siehe Abschnitte 5.3, 5.5.3, 6). Die Integration dieser und weitere Funktionalitäten in

umfassendere Applikationen ist durchaus denkbar und empfehlenswert. Vor dem Hintergrund, dass die App Strategie der Stadt Hamburg sich während des Projektes im Umbruch befand, wurden in diese Richtung keine konkreten Schritte eingeleitet.

Die Verknüpfung der Use Cases lässt sich noch weiter voran treiben um zusätzliche Synergien zu heben. Zum Beispiel könnten neben der in Abschnitt 5.2.2 erläuterten automatischen Änderungsdetektion, LiDAR-Punktwolken auch zur Extraktion von Elementen für die HD-Karten verwendet werden. Auf diese Weise ließe sich der manuelle Aufwand, der aktuell noch in die Erstellung der HD-Karten fließt, reduzieren, außerdem findet sich hier ein Ansatz zur Aktualisierung der HD-Karten. Ein ähnlicher Ansatz wird im mFund Projekt [ValStreet](#) verfolgt.

Neben den untersuchten und ähnlichen Use Cases, ließe sich die UDM auch in neu aufkommenden Themengebieten einsetzen. So kann die UDM benutzt werden, um die Parameter einer Operational Design Domain (ODD) zu verwalten. Die ODD eines autonomen oder teilautomatisierten Systems definiert die spezifischen Rahmenbedingungen, unter denen dieses sicher betrieben werden kann. Dazu gehören Faktoren wie Umgebung (z. B. Stadt oder Autobahn), Wetterbedingungen, Tageszeit und zulässige Geschwindigkeiten. Mit Hilfe der UDM kann eine dynamische Prüfung der ODD-Grenzen erfolgen und damit das aktuell gültige Einsatzgebiet bestimmt werden. Fahrzeugzulassungen könnten entsprechend dynamisch gestaltet werden. Im gleichen Zuge kann die UDM zur Kontrolle der Einhaltung der dynamischen Zulassung verwendet werden. Einsatzmöglichkeiten von autonomen und automatisierten Fahrzeugen können so erweitert werden, ohne die Sicherheit zu gefährden.

Für zukünftige Entwicklungen sollten auch die im Projekt geknüpften Kontakte wieder aufgegriffen werden. Gerade im Bereich der sensorgestützten Datenerfassung mit Crowd-Sourcing Ansätzen gibt es viele Überschneidungen mit anderen Vorhaben, insbesondere sei hier auch auf die mFund-Projekte [INFRASense](#) (siehe auch Anhang F) und [DEUS\\_SmartAir](#) verwiesen. Es empfiehlt sich, gemeinsam an einer Vereinheitlichung der Datenbeschreibung zu arbeiten, um Daten über Systemgrenzen hinweg teilen zu können und eine überregionale Vergleichbarkeit der Messungen zu ermöglichen.

Abschließend lässt sich sagen, dass die Fähigkeit der UDM, unterschiedlichen Stakeholdergruppen in Echtzeit hochpräzise und detaillierte Informationen über die reale Welt bereitzustellen, sie zu einem unverzichtbaren Bestandteil der digitalen Transformation unserer Städte und Verkehrssysteme macht. Auf dem Weg zum vollintegrierten System sind noch viele Hürden zu nehmen. In EDDY konnten essentielle Grundlagen geliefert werden, auf denen in weiteren Vorhaben aufgesetzt werden kann.

Ein Überblick über die im Projekt erstellten und veröffentlichten Ressourcen findet sich im Metadatenkatalog [Metaver](#).

## Literatur

- [1] Hideki Shimada et al. “Implementation and Evaluation of Local Dynamic Map in Safety Driving Systems”. In: *Journal of Transportation Technologies* 05.02 (2015), pp. 102–112. DOI: [10.4236/jtts.2015.52010](https://doi.org/10.4236/jtts.2015.52010).
- [2] Michael Scholz, Oliver Böttcher und Gülşen Bardak. „OpenDRIVE-HD-Karten mittels GDAL ins GIS bringen“. In: *FOSSGIS 2024*. März 2024. DOI: [10.5446/67601](https://doi.org/10.5446/67601).
- [3] Michael Scholz, Oliver Böttcher, and Gülşen Bardak. “Improving interoperability between OpenDRIVE HD map data and GIS using GDAL”. In: *FOSS4G Europe 2024*. July 2024. DOI: [10.5446/67601](https://doi.org/10.5446/67601).
- [4] Andreas Richter und Michael Scholz. *Road2Simulation-Leitfaden*. Techn. Ber. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), 2019. DOI: [10.5281/ZENODO.3375550](https://doi.org/10.5281/ZENODO.3375550).
- [5] Franz Andert et al. “On SLAM as a Service for Self-Driving Cars”. In: *DGON POSNAV, Positioning and Navigation for Intelligent Transport Systems*. 2024.
- [6] Jörg Peter Schäfer. “Faster Lock-Free Atomic Shared Pointers”. In: *Science and Information Conference, SAI 2024*, pp. 18–38.
- [7] Rasmus Rettig and Maximilian Weltz. “Virtuous, multi-level integration of research and education within the project “European Digital Dynamic Mapping” (EDDY)”. en. In: (2023). ISBN: 9783885797319 Publisher: [object Object]. DOI: [10.18420/INF2023\\_17](https://doi.org/10.18420/INF2023_17). URL: <https://dl.gi.de/handle/20.500.12116/43096> (visited on 05/14/2024).
- [8] Maximilian Weltz and Rasmus Rettig. “Localization of Autonomous Vehicles in Complex, Urban Environments and the Implementation Based on a Multi-Kalman Approach in Combination with a Local Dynamic Map”. In: Long Beach, California, Feb. 2024, pp. 1143–1157. DOI: [10.33012/2024.19568](https://doi.org/10.33012/2024.19568). URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=19568> (visited on 05/14/2024).
- [9] Michael Scholz, Oliver Böttcher, and Andreas Richter. “A Spatial Issue Tracking System Boosting the Development of Track-Based Testing Environments”. In: *Transport Research Arena (TRA) 2018*. Proceedings of the 7th Transport Research Arena (TRA) 2018. Apr. 2018. URL: <https://elib.dlr.de/119841/>.
- [10] Jörg Peter Schäfer, Gurucharan Srinivas, and Oliver Böttcher. “Towards Local Dynamic Maps: Automatic Validation and Correction of Road Map Features”. In: *International Conference on Geoinformation Data, Processing and Applications (GeoDPA)*. 2024.
- [11] Raphael Sauer, Tim Vogler und Robin Blessin. *Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW Hamburg)*. Techn. Ber. Inline Anonymizer, 2023.
- [12] STMicroelectronics. *ISM330DHCX: iNEMO inertial module, ultra-low-power high-performance 3D accelerometer and 3D gyroscope*. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/ism330dhcx.pdf>. Accessed: October 2023.
- [13] Christoph Mohr. *Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW Hamburg)*. Techn. Ber. Sensorsystem zur Erhöhung der Sicherheit des Fahrradverkehrs, 2024.
- [14] Jörg Peter Schäfer, Clarissa Böker, et al. “Spatio-Temporal Alignment between Cooperative Sensor Platforms”. In: *27th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*. 2024.
- [15] Chansoo Kim et al. “Updating Point Cloud Layer of High Definition (HD) Map Based on Crowd-Sourcing of Multiple Vehicles Installed LiDAR”. In: *IEEE Access* 9 (2021), pp. 8028–8046. DOI: [10.1109/access.2021.3049482](https://doi.org/10.1109/access.2021.3049482).

- [16] Matthias Hartwig. *Rechtsfragen der Datenökonomie – Empfehlungen aus der Stakeholderperspektive*. 2024. URL: <https://www.ikem.de/publikation/rechtsfragen-der-datenoekonomie-empfehlungen-aus-der-stakeholderperspektive/>.

## A. Anforderungskatalog

Tabelle 7: Klassifikation der Anforderungen an die UDM: mandatory (M, dt.: verpflichtend), optional (O).

ID	Requirement	Classification
General		
001	The UDM should be supervised by public authorities	M
002	The UDM should be publicly available	M
003	The UDM should be implemented over large areas in a harmonized manner	M
004	The UDM shall be implemented in an use-case-open manner	M
005	The UDM's architecture should be modular and expandable	M
006	The UDM shall be scalable for increasing number of users and data traffic	M
007	The UDM shall be scalable in covered area	M
008	For critical functions the UDM should be set up such that continuous operation is possible under all conditions	M
Communication		
101	It needs to be possible to read from and write on the UDM	M
102	For use of the UDM users or applications need to be vetted by an authorization process	M
103	It should be possible to give authorization for read only, write only or both	O
103_1	The authorization should be specific for each data type	O
103_2	The authorization should be user-group- or application-specific	O
104	It should be possible to filter data transfer from the UDM to user/application in an efficient manner for relevant information	O
105	The UDM shall use IP-based communication channels and compatible interfaces	M
105_1	The used communication channels shall be secure	M
106	Data transfer from and to the UDM should be efficient/fast	O
107	For highly dynamic data of critical safety relevance (see below V2X messages) low latency communication	O
Data Storage and Maintenance		
201	The UDM must apply data maintenance processes	M
201_1	Data maintenance must include removing outdated data	M
201_2	It should be possible to give specific parameters for maintenance for each data type	O
201_3	Data maintenance should include statistical processes for information on the same object	O
202	The UDM should provide historical data for further analysis	O

202_1	It should be possible to give specific parameters for archiving each data type, such as rate and extent	0
203	Data values provided by the UDM should be given with some form of confidence value	0
204	Data values from sensors should include a form of confidence value	0
<b>Data Space</b>		
301	Data in the UDM shall support automated and connected driving functions and the efficiency and safety of maneuvers, routing and navigation	M
302	Space covered by the UDM shall include the driving lanes and adjacent areas	M
303	The driving lanes should be covered by High Definition (HD) Maps	0
304	The UDM should be able to store and provide Light Detection and Ranging (LIDAR) point clouds	0
305	The UDM shall include georeferenced objects, users can utilize to localize themselves	M
306	Traffic signs should be among the objects included in the UDM	0
307	Objects used for localization should be updated in the UDM in case of deviation detected by sensors	M
307_1	In case of deviation and if applicable, the official registers should be notified for further investigation	0
308	The UDM shall be able to store grid data	0
308_1	Grid specifics, such as cell size, and processing into the grid should be data-type-specific	0
309	The data model(s) shall be flexible such that new data types with a new set of attributes can be integrated	M
<b>Data Use</b>		
401	Data provided by the UDM should include metadata	M
402	It should be possible to abstract and analyze the UDM's primary data for use in public traffic and asset management	0
4003	The UDM shall protect data privacy according to applicable laws, especially the „Datenschutzgrundverordnung“	M
404	Suitable original data from the UDM shall be provided to the German National Access Point (NAP) for mobility data, the „Mobilithek“	M
<b>Standardization</b>		
501	The architecture of the UDM should be compatible to the ISO 18750	0

502	Information on traffic participants should be exchanged with the UDM as specified by ETSI V2X messages, especially the Cooperative Awareness Message (CAM) and Collective Perception Message (CPM)	0
503	Furthermore, the information should be exchanged as specified by corresponding C-Roads and C2CCC profiles	0
504	Geodata should be exchanged by interfaces specified by the Open Geospatial Consortium (OGC)	0

## B. User Stories

### B.1. User Story 2.1: LiDAR-Navigation via UDM-Karten

#### User Story 2.1: LiDAR-Navigation via UDM-Karten

**Verantwortung:** DLR

Als Fahrzeug möchte ich eine Refenz-Punktwolkenkarte aus der UDM erhalten, um bei GNSS-Ausfall mit meiner Sensor-Lokalisierung (LiDAR-SLAM) navigieren zu können.

Als Fahrzeug möchte ich LiDAR-Punktwolken-Snapshots in die UDM hochladen, um sie dort zu einer Gesamtkarte aggregieren zu lassen.

#### Ziele

- LiDAR-Navigation ermöglichen, ohne das Gebiet zuvor selbst eingefahren haben zu müssen.
- Automatisiertes Fahren ohne GNSS.

#### Forschungsfragen, Probleme und Verwertung

- Wo demonstriert man diese User Story am besten? Idealerweise wo GNSS schlecht ist, erfahrungsgemäß bspw. im Bereich HEAT; unter Brücken, Tunneln (Wallingtunnel) usw.
- Können die schlechten GNSS-Daten auch für andere Nutzer nutzbar gemacht werden?
- Wie oft (Framerate) werden Punktwolken an die UDM gesendet? Muss eine Vor-Aggregation stattfinden?
- Zur Übertragung dieser größeren Datenmengen mit höheren Frequenzen scheinen bisher keine Standard-Schnittstellen und -Datenformate wie bspw. WFS zu existieren.
- Backend-seitige Fusion von Daten unterschiedlicher Fahrzeuge als große Herausforderung.
  - Welche konkreten Meta-Informationen sind notwendig, um UDM-seitige Fehlerbereinigung und Aggregation durchzuführen?

- Anknüpfung: Update von Punktwolkenkarten bspw. bei neuem Gebäude.
- Sind Verfahren zur Post-Processing-Korrektur von Trajektorien z.B. im Tunnel verfügbar?
- Mögliche Veröffentlichung: Bewertung der Kartierungsqualität bzw. Genauigkeit der Georeferenzierung bei automatischer Kartierung.
- Mögliche Veröffentlichung: Vergleich verschiedener (bereits vorhandener) Verfahren zur Landmarken-Lokalisierung, u.a. mit bereits eingemessenen Punkt-Landmarken.
- Anknüpfung: Abgleich von Punktwolkendaten mit bereits eingemessenen HD-Kartendaten.

## B.2. User Story 2.2: Landmarken-Navigation via UDM-Karten

User Story 2.2: Landmarken-Navigation via UDM-Karten

**Verantwortung:** HAW

Als Fahrzeug möchte ich Refenz-Landmarken aus der UDM erhalten, um bei GNSS-Ausfall mit meiner Sensor-Lokalisierung navigieren zu können. Dabei können Landmarken beliebige Geo-Objekte sein – wie bspw. Schilder oder Pfoften aus einem amtlichen Kataster.

### Ziele

- Landmarken-Navigation ermöglichen, ohne das Gebiet zuvor selbst eingefahren haben zu müssen.

### Forschungsfragen, Probleme und Verwertung

- Welche/wie viele Landmarken werden gebraucht, um eine durchgängig hohe Abdeckung mit hoher Genauigkeit zu erreichen?
- Wie weit müssen Daten vorgehalten werden, um durchgehend Informationen zur Verfügung zu haben (Latenz, Empfangsprobleme etc.)?
- Bewertung der Performance von Einzelsystemen und kombiniertem Ansatz zur Eigenlokalisierung. Welcher Vorteil entsteht?
- Welche Typen von Landmarken bringen welchen Nutzen (mikroskopisch vs. makroskopisch)?
- Wie lassen sich Landmarken im Hintergrund in der UDM Ablegen? Antwort: Man kann neue Landmarken über unsere OGC API Features in die dafür vorgesehene Feature Collection laden.

### B.3. User Story 2.3a: Trigger-basierte Datenerfassung nach Interessensgebiet

User Story 2.3a: Trigger-basierte Datenerfassung nach Interessensgebiet

**Verantwortung:** FHH

Als Stadt möchte ich bedarfsgerecht *Trigger-Punkte* an Stellen definieren, an denen Sensordaten-*Snapshots* von Verkehrsteilnehmern in die UDM übertragen werden sollen. Dabei können Snapshots bspw. von Kameras oder Laser-Scannern geliefert werden.

Die zu den Triggern gemeldeten Snapshots sollen als Vorgänge („Issues“) im *Spatial Issue Tracker*-Tool verwaltet werden.

#### Ziele

- Der LGV möchte Abweichung zwischen Geobasisdaten und sensorisch erkannten Daten festhalten und städtische Daten dadurch aktuell halten können (bspw. das Verkehrszeichenkataster).

### B.4. User Story 2.3b: Trigger-basierte Datenerfassung nach Objekttyp

User Story 2.3b: Trigger-basierte Datenerfassung nach Objekttyp

**Verantwortung:** FHH

Als Stadt möchte in bedarfsgerecht *Trigger-Objekttypen* definieren, zu denen Sensordaten-*Snapshots* von Verkehrsteilnehmern in die UDM übertragen werden sollen. Dabei können die Objekttypen bspw. Baustellenbaken oder Verkehrszeichen sein.

Die zu den Triggern gemeldeten Snapshots sollen als Vorgänge („Issues“) im *Spatial Issue Tracker*-Tool verwaltet werden.

#### Ziele

- Der LGV möchte Abweichung zwischen Geobasisdaten und sensorisch erkannten Daten festhalten und städtische Daten dadurch aktuell halten können (bspw. das Verkehrszeichenkataster).

#### Forschungsfragen, Probleme und Verwertung

- Baustellenbaken in Hamburg sind generell sehr schlecht definiert und sind nicht trivial zu erkennen.
- Die Punkte eines Baustellenpolygons sind nicht notwendigerweise nur durch die Bakenpositionen definiert, sondern enthalten auch noch weitere Zusatzpunkte.
- Ab wann ist die Datenaufnahme zu einem Trigger abgeschlossen? Abschaltbedingungen müssen entsprechend definiert werden.

- Welche (Geobasis)Daten (über die Landmarken hinaus) lassen sich im Rahmen von Befahrungen in EDDY detektieren?
- Ausblick: Ein optionaler „Geofence“ kann die Region der Datenaufnahme einschränken.

## B.5. User Story 2.4: Fahrzeugseitige Änderungsdetektion an Baustellenbaken

User Story 2.4: Fahrzeugseitige Änderungsdetektion an Baustellenbaken

**Verantwortung:** FHH

Als Fahrzeug möchte ich Baustellenbaken-Daten aus der UDM mit meinen sensorisch erfassten Baken-Objekten vergleichen, um Abweichungen zu erkennen und daraufhin Sensordaten-*Snapshots* in die UDM zu übertragen.

Güte-Informationen (Konfidenzen) in Form von Kovarianzen ergänzen die übertragenen Snapshots, um nachgelagert eine manuelle Nachverarbeitung (Bestandsdatenkorrektur) zu ermöglichen.

### Ziele

- Der LSBG möchte Details zu im Feld aufgestellten Baustellenbaken erhalten. Die Baustellenkoordinierung stellt einen Beispielanwendungsfall für die Generierung von Mehrwert aus Sensordaten von Verkehrsteilnehmern dar. Dabei sollen sich Mitarbeitende, die Baustellenumsetzungen mit Planungsdaten abgleichen, bereits vor regelmäßigen Kontrollfahrten anhand der im Vorfeld eingetroffenen Sensorinformationen ein genaues Bild der veränderten Verkehrsführung machen können. Ressourcenintensive Befahrungen können dann ggf. entfallen.

### Forschungsfragen, Probleme und Verwertung

- Wie lassen sich die gewonnen Informationen in der UDM ablegen und effizient an die städtischen Institutionen verteilen?
- Wie kann erkannt werden, wo eine Baustelle beginnt und endet, sodass nur relevante Informationen übermittelt werden?
- Ausblick: Ein optionaler „Geofence“ kann die Region der Datenaufnahme einschränken.
- Ausblick: Bereiche detektierter Änderungen können in Rasterkarte dargestellt werden.
- Ausblick: UDM-seitige, *automatisierte Detektion von Abweichungen* zwischen Bestandsdatensatz und der erfassten Realität aus Fahrzeugdaten. („Deduplizierung von Infrastrukturobjekten“.) Wie kann sichergestellt werden, dass die Fahrzeugdaten valide sind und der Realität entsprechen?
- Ausblick: UDM-seitige, *automatisierte Korrektur* der Bestandsdaten mithilfe zuvor detektierter Abweichungen.

## B.6. User Story 3.1: Erfassen und Versenden dynamischer Objektdaten

User Story 3.1: Erfassen und Versenden dynamischer Objektdaten

**Verantwortung:** LSBG

Als Fahrzeug oder Infrastruktur möchte ich mit meiner Sensorik *vulnerable road user* (VRU) erkennen, um deren Objektinformationen als V2X-CPM über eine IP-basierte Schnittstelle an die UDM zu senden.

### Ziele

- Verwendung von V2X-Daten außerhalb der V2X-Reichweite für andere Nutzer ermöglichen (siehe User Story 4.1: Aggregation von dynamischen V2X-Daten).

### Forschungsfragen, Probleme und Verwertung

- Optionales Entpacken der Objektinformationen in der UDM zur weiteren Verarbeitung. Mögliche Erweiterung: Weiter entfernte road-side units (RSU) beziehen die VRU-Informationen aus der UDM und senden CPM aus.
- Wie können VRU-Trajektorien bewertet werden, um daraus das Gefahrenpotenzial abzuleiten? Mögliche Erweiterung: Analyse dieser VRU-Informationen und Versand von Warnungen per DENM im Gefahrenfall.
- Die Größe des CPM-Message-Buffers ist variabel. Wie groß muss er sein, bzw., wie viele Nachrichten benötigt man? Wird er überhaupt benötigt? Analog zu User Story 3.2: Dynamische Objekte senden Eigeninformationen an UDM.

## B.7. User Story 3.2: Dynamische Objekte senden Eigeninformationen an UDM

User Story 3.2: Dynamische Objekte senden Eigeninformationen an UDM

**Verantwortung:** CIT

Als Verkehrsteilnehmer möchte ich Informationen über mich selbst als V2X-CAM zusammenstellen, um diese über eine IP-basierte Schnittstelle an die UDM zu senden.

### Ziele

- Verwendung von V2X-Daten außerhalb der V2X-Reichweite für andere Nutzer ermöglichen (siehe User Story 4.1: Aggregation von dynamischen V2X-Daten).

### Forschungsfragen, Probleme und Verwertung

- Mögliche Erweiterung: UDM-seitiger Abgleich dieser CAM mit CPM anderer Verkehrsteilnehmer und *Deduplizierung*.

- Gesammelte CAM-Informationen können den „Cooperative GLOSA Use Case“ der Projekte C2C/C-Roads unterstützen.
- Die Größe des CAM-Message-Buffers ist variabel. Wie groß muss er sein, bzw., wie viele Nachrichten benötigt man? Wird er überhaupt benötigt? Analog zu User Story 3.1: Erfassen und Versenden dynamischer Objektdaten.

### B.8. User Story 3.3: Weiterleitung von V2X-Nachrichten in die UDM

User Story 3.3: Weiterleitung von V2X-Nachrichten in die UDM

**Verantwortung:** CIT

Als Fahrzeug oder Infrastruktur *mit UDM-Anbindung* möchte ich V2X-Nachrichten (CPM oder CAM) anderer Teilnehmer empfangen, um diese über eine IP-basierte Schnittstelle an die UDM weiterzuleiten.

#### Ziele

- Verwendung von V2X-Daten außerhalb der V2X-Reichweite für andere Nutzer ermöglichen (siehe User Story 4.1: Aggregation von dynamischen V2X-Daten).

#### Forschungsfragen, Probleme und Verwertung

- Wissenschaftliche Verwertung bspw. durch Stresstests, Auslastung, Latenzen usw.

### B.9. User Story 4.1: Aggregation von dynamischen V2X-Daten

User Story 4.1: Aggregation von dynamischen V2X-Daten

**Verantwortung:** OECON

Als UDM möchte ich die empfangenen V2X-Nachrichten aggregieren, um daraus eine Verkehrsdichtekarte als Raster erstellen zu können.

Als UDM möchte ich die Verkehrsdichtekarte über standardisierte Raster-Schnittstellen bereitstellen, um sie für andere Nutzer in GIS- und Kartenanwendungen nutzbar zu machen.

#### Ziele

- Anderweitig nicht vorhandene Verkehrsdichteinformation aus V2X-Nachrichten ableiten können.
- Intelligente Verkehrssteuerung durch live-Daten ermöglichen.
- Fahrzeuge können Route aufgrund von Echtzeitdaten besser planen und aktualisieren.
- Analyse und live-Anzeige von VRU-Hotspots.

## Forschungsfragen, Probleme und Verwertung

- Welche Datenformate/Datenkompression usw. sind optimal; insbesondere bei hoher Auslastung der Kommunikationskanäle?
- Ausblick: Aggregation von Aufenthaltswahrscheinlichkeiten von Fahrzeugen aus LiDAR-Daten (User Story 2.1: LiDAR-Navigation via UDM-Karten) wäre als Occupancy Grid machbar. Ist das sinnvoll?
- Mögliche Erweiterung: Behörden können Verkehrsdichteinformationen nutzen, um bspw. Konfliktbereiche zu erkennen und Maßnahmen zu ergreifen.
- Mögliche Erweiterung: Fahrzeug erkennt und bewertet Status (z. B. ODD-Verletzung) und ergreift Maßnahmen.
- Verwertung: C-Roads Use Case „PVD“ unterfüttern.

## B.10. User Story 4.1.1: Ableiten von relativen abbiegenden Verkehrsflüssen im Kreuzungsbereich aus dynamischen V2X-Daten

User Story 4.1.1: Ableiten von relativen abbiegenden Verkehrsflüssen im Kreuzungsbereich aus dynamischen V2X-Daten

**Verantwortung:** UBI

Als UDM möchte ich die empfangenen *CAM*-Nachrichten aggregieren, um daraus relative Abbiegevorgänge (nach Richtung) an Kreuzungen zu berechnen.

Dabei wird der Verkehr auf Verkehrsachsen des OpenStreetMap-Straßenmodells (OSM) abgebildet.

### Ziele

- Über den Tagesverlauf Verkehrsströme an Kreuzungen nach Abbiegerichtung klassifizieren zu können, ohne zusätzliche erkennende Sensorik vor Ort installieren zu müssen.

## Forschungsfragen, Probleme und Verwertung

- Als Platzhalterdaten können vorerst FCD-Daten (floating car data) verwendet werden.
- Mit laufender Deduplizierung später auch auf CPM erweiterbar.
- Ausblick: Fahrstreifengenaue HD-Karten des LGV könnten in OSM-Datenmodell überführt werden und analog mit der OSRM verwendet werden, um so den Verkehr sogar *fahrstreifengenau* abbilden zu können. (OSM-Daten ermöglichen dies üblicherweise nur verkehrssachsengenau.)

## B.11. User Story 4.2: Aggregation dynamischer Verkehrsteilnehmersensordaten

### User Story 4.2: Aggregation dynamischer Verkehrsteilnehmersensordaten

**Verantwortung:** CIT

Als Verkehrsteilnehmer (bspw. Scooter) möchte ich Sensordaten sammeln und aufbereiten, um sie über eine IP-basierte Schnittstelle an die UDM zu senden.

Als UDM möchte ich Sensordaten empfangen, um sie in einer Live-Datenbank abzulegen.

Als UDM möchte ich die *Live-Sensordaten* über standardisierte Schnittstellen bereitstellen, um sie für Konsumenten nutzbar zu machen.

Als UDM möchte ich Sensordaten empfangen, um sie statistisch aufzubereiten, zu aggregieren und in einer historischen Datenbank abzulegen.

Als UDM möchte ich die *historischen Sensordaten* über standardisierte Schnittstellen bereitstellen, um sie für Konsumenten nutzbar zu machen.

### Ziele

- Informationen über Straßenzustand (Schlaglöcher, Streckenabschnittsbeschaffenheit) für Behörden bereitstellen können.
- Informationen zu Straßenbeleuchtung und Luftqualität für Behörden und andere Nutzer bereitstellen können.

### Forschungsfragen, Probleme und Verwertung

- Fokus auf statistische Auswertung der Objektdaten zum Generieren von Mehrwert für die FHH.
- Anonymisierung der gesammelten Scooter-Daten stellt große Herausforderung dar. Solche räumlichen Daten ermöglichen durch Verschneidung mit anderen Daten schnell das Ableiten personenbezogener Informationen.
- Ausblick: Ein optionaler „Geofence“ kann die Region der Datenaufnahme einschränken.

## B.12. User Story 4.2.1: Automatisches Erzeugen von Spatial Issues aus Schlaglochinformationen

### User Story 4.2.1: Automatisches Erzeugen von Spatial Issues aus Schlaglochinformationen

**Verantwortung:** CIT

Als UDM möchte ich aus aggregierten Scooter-Sensordaten zu Schlaglöchern bei Grenzwertüberschreitung automatisch einen Vorgang („Issue“) im *Spatial Issue Tracker*-Tool erstellen.

## Ziele

- Die FHH über problematischen Straßenzustand benachrichtigen.

## B.13. User Story 4.3: Bereitstellen dynamischer Regenradar-Daten über UDM

User Story 4.3: Bereitstellen dynamischer Regenradar-Daten über UDM

**Verantwortung:** UBI

Als UDM beziehe ich Regenradar-Daten des DWD, um sie als Rasterdaten aufzubereiten.

Als UDM stelle ich die aufbereiteten Regenradar-Rasterdaten über standardisierte Schnittstellen bereit, um sie für Konsumenten nutzbar zu machen.

## Ziele

- Regenradardaten über standardisierte Geodatenchnittstellen zugänglich machen.
- Zwischenspeichern der Wetterdaten anstelle des einfachen Weiterleitens vom DWD:
  - Um Performances des Systems selber steuern zu können (Load-Balancing/Skalierung).
  - Möglichkeit zur Bereitstellung verschiedener Wetterdatenquellen über die gleiche Schnittstelle.
  - Um Ausfallsicherheit gewährleisten zu können.
    - \* Rückfallebene: Falls zum Abfragezeitpunkt keine realen Messdaten vorliegen, sollen Prognosedaten ausgegeben werden.
    - \* Eindeutige Kennzeichnung von realen Messdaten vs. Prognosedaten (bspw. im separaten raster-Band).
- Kann zur ODD-Validierung entlang der Route eines Fahrzeugs verwendet werden.

## B.14. User Story 4.4: Dashboard zur Datenvisualisierung

User Story 4.4: Dashboard zur Datenvisualisierung

**Verantwortung:** UBI

Als Dashboard-Anwendung greife ich auf UDM-Daten zu, um sie thematisch zu visualisieren.

## B.15. User Story 4.5: Dashboard Datenvisualisierung von Curb Side Management

User Story 4.5: Dashboard Datenvisualisierung von Curb Side Management

**Verantwortung:** UBI

Als Dashboard-Anwendung greife ich auf UDM-Daten des Curb Side Managements zu, um sie thematisch zu visualisieren.

## C. Klassendiagramme und Datenmodellldetails

### C.1. Klassendiagramm zur Übertragung von LiDAR-Punktwolken

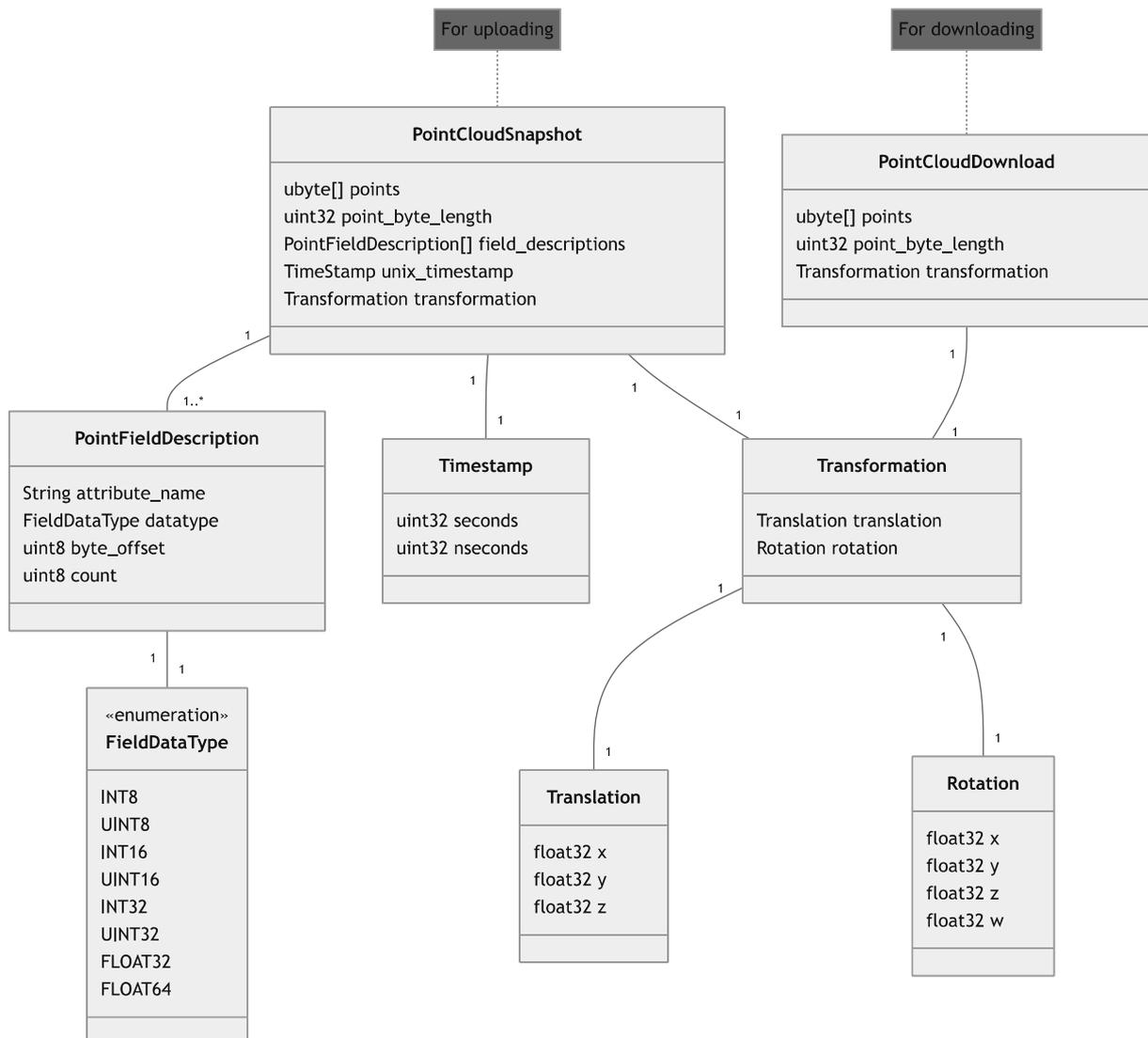


Abbildung 35: Klassendiagramm zum Austausch von LiDAR-Daten mit der UDM

Das Klassendiagramm in Abbildung 35 veranschaulicht die Struktur der zum Server gesendeten Daten (Upload) und der vom Server zurückgegebenen Daten (Download). Für beide Übertra-

gungsrichtungen dienen die zusätzlich mitübermittelten Transformationsparameter der korrekten geografischen Interpretation der Punktdaten. Zur Serialisierung der Daten für die Übertragung wird [FlatBuffers](#) verwendet.

Wichtig bei diesem Datenaustausch ist, dass die binären Punktwolken-Daten nicht geografisch referenziert übertragen werden, da dies 64-Bit-kodierte Daten voraussetzen würde, um eine Koordinatengenauigkeit im Zentimeterbereich gewährleisten zu können. Zur Reduzierung der Datenmenge unter Beibehaltung der Koordinatengenauigkeit wird stattdessen eine 32-Bit-Kodierung mit zusätzlicher Angabe von Transformationsparametern verwendet. Dies ermöglicht eine effiziente Übertragung über die Internet-Schnittstelle. Die affinen Transformationsparameter dienen zur Umrechnung der auf diese Weise „komprimierten“ Punktdaten ins projizierte Koordinatenreferenzsystem WGS 84 / UTM zone 32N ([EPSG:32632](#)). Mit diesen Parametern können die individuellen Punktwolken-Ausschnitte serverseitig korrekt transformiert werden, was für deren Zusammenfügen zu einer globalen Punktwolke notwendig ist.

## C.2. Klassendiagramm für die Landmarken-Navigation

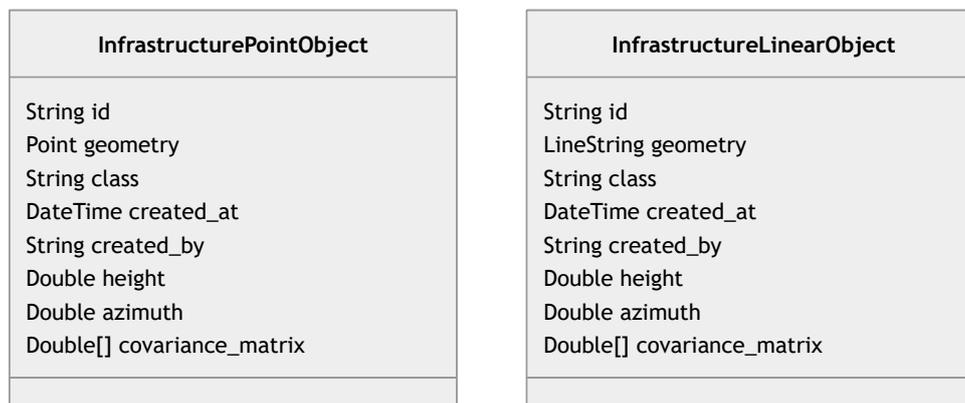


Abbildung 36: Klassendiagramm zum Abrufen von Verkehrsinfrastrukturobjekten von der UDM zur Landmarken-Navigation

### C.3. Klassendiagramm für die bedarfsgesteuerte Datenerfassung

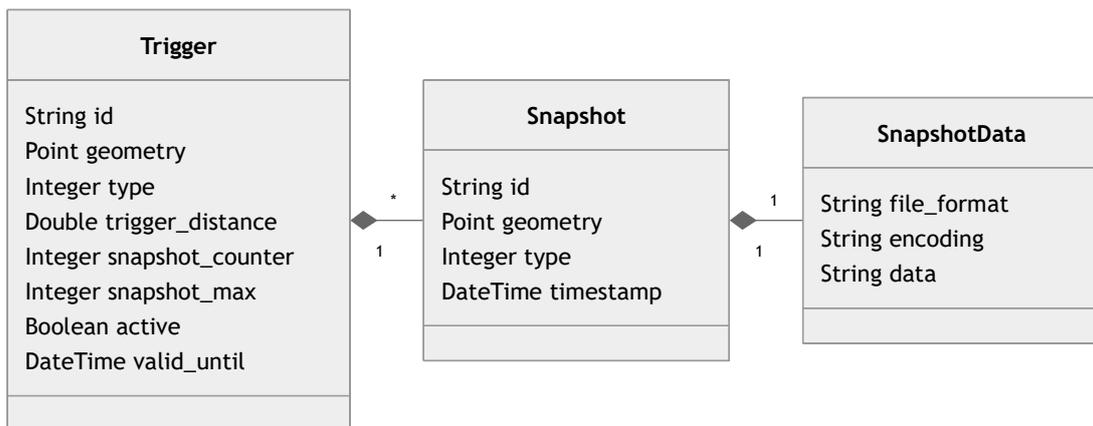


Abbildung 37: Klassendiagramm zum Austausch von Triggern und Sensordaten-Snapshots mit der UDM

### C.4. Datenmodelldetails zum Austausch von V2X-Nachrichten mit der UDM

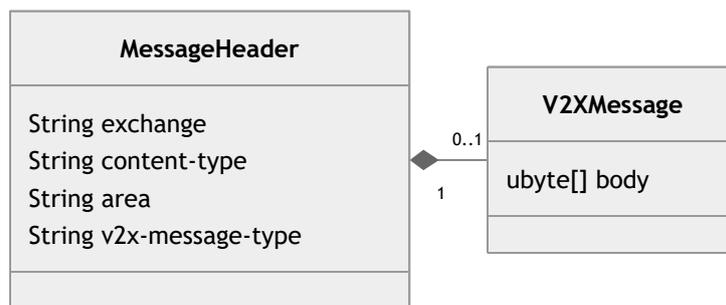


Abbildung 38: Klassendiagramm zum Austausch von V2X-Nachrichten mit der UDM

Tabelle 8: Eigenschaften von MessageHeader

Attribut	Beispielwert	Beschreibung
<b>exchange</b>	vehicle-1337	exchange-Name, an den die Nachricht im AMQP-Broker gepublisht werden soll
<b>content-type</b>	application/octet-stream	HTTP-Medientyp des Nachrichteninhalts (body)
<b>area</b>	circle;POINT(10.5534 52.10);1000 polygon;POLYGON((long1 lat1, long2 lat2, ...))	Area of interest für das geo-fenced Message-Routing auf Broker-Seite: Entweder als Kreismittelpunkt in WGS 84 longitude/latitude mit Radius in Metern, oder als Polygon
<b>v2x-message-type</b>	cam, cpm, denm	Typ der V2X-Nachricht im body; kann zum Konsumieren leer bleiben

Das Klassendiagramm in Abbildung 38 zeigt, wie eine UPER-kodierte Nachricht mit einem

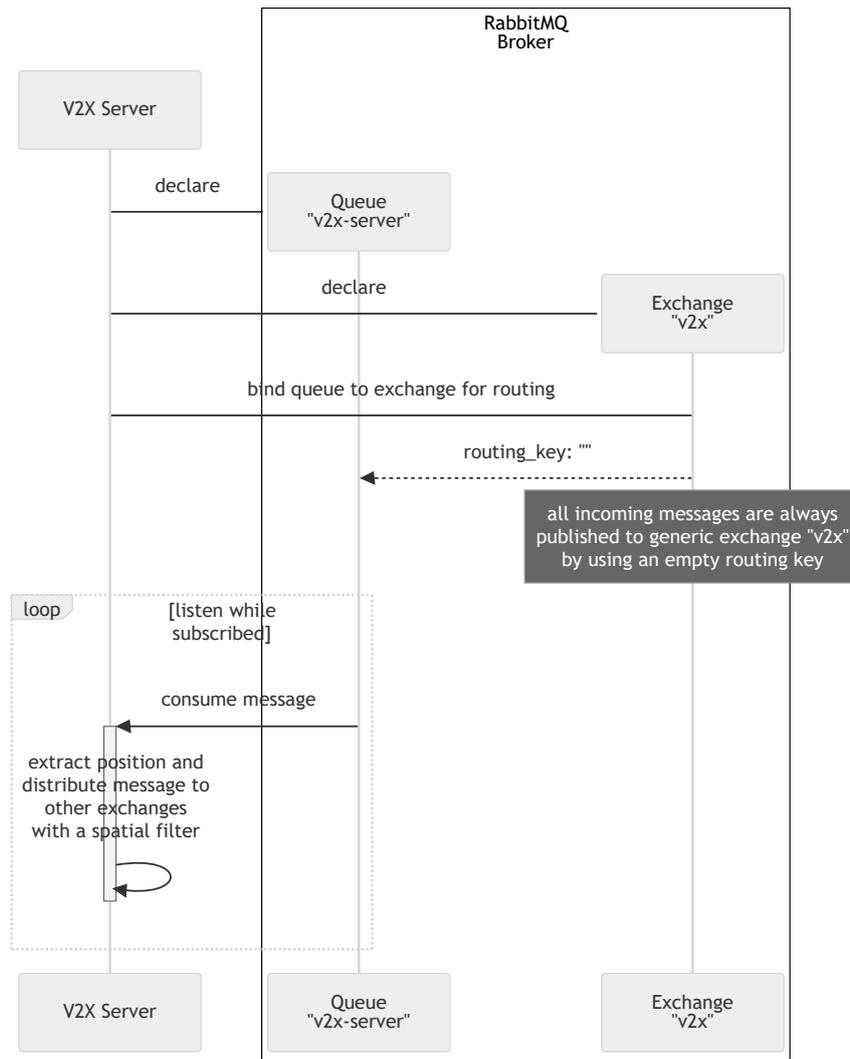


Abbildung 39: Sequenzdiagramm des initialen Deklarierens von Exchange und Queue des EDDY-V2X-Servers, welcher das räumliche Verteilen von Nachrichten steuert

Header versehen wird, der alle notwendigen Informationen enthält, um die Nachricht auf Server-Seite korrekt verarbeiten zu können. Tabelle 8 beschreibt die Konfiguration des Headers im Detail. Das Sequenzdiagramm in Abbildung 39 zeigt die initiale Registrierung des V2X-Servers am RabbitMQ-Broker.

## D. Gegenüberstellung unterschiedlicher Aggregationsvarianten

**Variante 1** Direkte Aggregation zu Grid-Zellen im Stream-Verarbeitungsprozess von Apache Flink durch Aufspannen eines Zeitfensters. Erst nach dem Schließen eines Zeitfensters werden lediglich die befüllten Gitterzellen mit den Aggregationswerten in die räumliche Datenbank persistiert. Diese können direkt über einen OGC-Web-Service als Layer bereitgestellt werden.

Vorteile:

- Verwerfen von Punkt-Rohdaten direkt nach Aggregation und daher aus Datenschutzperspektive robust

- Geringerer Speicherbedarf, da nur Aggregationsergebnisse persistiert werden
- Einfache Bereitstellung des Aggregationsergebnisses direkt aus der Datenbank über OGC-Web-Services (WMS, WFS oder API Maps/API Features) durch bspw. [GeoServer](#) oder den EDDY-Vector-Data-Service mit der Möglichkeit einer nativen Filterung nach Zeit durch den anfragenden Klienten
- Nachträglich immer ad hoc zu gröberen Zellen aggregierbar mit räumlichen SQL-Funktionen auf Datenbankebene oder auf Anwendungsseite des Klienten

Nachteile:

- Höherer Implementierungsaufwand in Java für Apache Flink
- Wenig Flexibilität bei wechselnden Aggregationsparametern (Zeitfenster, Zellgröße, statistische Methode), da kein Zugriff auf aufgezeichnete Rohdaten und daher von durchgehendem Datenstrom abhängig
- Bei Verlust von Aggregationsergebnissen keine Möglichkeit der Wiederherstellung aus aufgezeichneten Rohdaten

**Variante 2** Extraktion von Punkt-Rohdaten im Stream-Verarbeitungsprozess von Apache Flink und Persistierung lediglich dieser in Datenbank. Eine Aggregation erfolgt anschließend mit räumlichen SQL-Funktionen auf Datenbankebene. Die Bereitstellung über einen OGC-Web-Service nutzt einfach gehaltene SQL-Views zur ad-hoc-Aggregation bei Anfrage durch einen Klienten.

Vorteile:

- Geringster Implementierungsaufwand
- Gute Performance auch bei großen Datenmengen, da räumliche und zeitliche Indizes auf Datenbankebene optimal genutzt werden können
- Große Flexibilität bei wechselnden Aggregationsparametern (Zeitfenster, Zellgröße, statistische Operatoren), da Aggregation mit SQL-Funktionen auf Rohdaten arbeitet
- Ein GeoServer oder der EDDY-Vector-Data-Service stellt über einen OGC-Web-Service immer nur das Ergebnis einer Aggregationsabfrage bereit

Nachteile:

- Punkt-Rohdaten müssen dauerhaft gespeichert werden, was datenschutzrechtlich problematisch ist
- Höherer Speicherbedarf durch Rohdatenhaltung: Punkt-Rohdaten müssen dauerhaft gespeichert werden, um zeitlich zurückreichende Aggregationsanfragen bedienen zu können

**Variante 3** Extraktion von Punkt-Rohdaten im Stream-Verarbeitungsprozess von Apache Flink und Persistierung lediglich dieser in räumlicher Datenbank. Die Aggregation wird nicht auf Datenbankebene wie in Variante 2 durchgeführt, sondern ad hoc durch bspw. den GeoServer erst beim Anfragen des Karten-Layers durch einen Klienten. Dafür muss der GeoServer um einen OGC Web Processing Service (WPS) für die Aggregation erweitert werden. Dieser WPS kann anschließend in einer [rendering transformation](#) verwendet werden.

Vorteile:

- Starke Konformität mit einem rundum standardisierten Prozess, da selbst die Aggregation über die standardisierte Schnittstelle eines WPS realisiert wird

Nachteile:

- OGC WPS muss extra implementiert werden bzw. bereits bestehende WPS-Funktionen müssen elegant konkateniert werden (siehe [WPS process chaining](#))
- Bei Aggregation größerer Datenmengen sehr langsam, da Punkt-Rohdaten für räumliche und zeitliche Filterung erst komplett an den GeoServer übertragen werden müssen, bevor dort die Aggregation stattfinden kann
- Kein Vorteil der Nutzung von Datenbankindizes

**Variante 4** Extraktion von Punkt-Rohdaten im Stream-Verarbeitungsprozess von Apache Flink und Persistierung lediglich dieser in räumlicher Datenbank. Direktes Bereitstellen dieser Rohdaten über einen OGC-Web-Service (WMS, WFS oder API Maps/API Features) als Karten-Layer.

Vorteile:

- Ein GeoServer oder der EDDY-Vector-Data-Service kann die Daten direkt aus einer Datenbank über einen OGC-Web-Service bereitstellen
- Schnelle Prototyp-Entwicklung (rapid prototyping) durch große Flexibilität bei wechselnden Aggregationsparametern (Zeitfenster, Zellgröße, statistische Operatoren), da Aggregation immer erst dynamisch und live im Web-Browser des anfragenden Klienten durchgeführt wird

Nachteile:

- Bei Aggregation größerer Datenmengen sehr langsam, da Punkt-Rohdaten für räumliche und zeitliche Filterung erst komplett an den Web-Browser des anfragenden Klienten übertragen werden müssen, bevor dort die Aggregation stattfinden kann
- Kein Vorteil der Nutzung von Datenbankindizes
- Umständliche Ableitung weiterführender Datenergebnisse, da gesamte Verarbeitungslogik im Web-Browser des Klienten implementiert sein muss
- Punkt-Rohdaten müssen dauerhaft gespeichert werden und werden in Gänze durch Klienten abfragbar gehalten, was datenschutzrechtlich problematisch ist

## E. Architecture Decision Records (ADR)

### E.1. ADR 001: OGC API Features zum Abfragen und Übertragen statischer Geodaten

#### Kontext und Problemstellung

Vektorbasierte statische und semi-statische Geodaten mit einer Änderungscharakteristik von „monatlich“ bis „täglich“ sollen durch Nutzer standardkonform abgefragt und aus der UDM sowie in die UDM übertragen werden können. Weiterhin möchten wir unter Beibehaltung derselben Dateninteraktionsmöglichkeit neue thematische Datensätze (Geodaten-Layer/„feature collections“) bedarfsgerecht aus GIS-Anwendungen heraus mit geringem Mehraufwand in der UDM bereitstellen können.

#### Entscheidungstreiber

- Schnelles Aufsetzen eines ersten Prototyps zum Übertragen amtlicher Verkehrsinfrastrukturdaten (Straßenschilder) aus der UDM ins Fahrzeug der HAW für die Anwendung der Selbstlokalisierung.
- Verwenden etablierter und offener Datenübertragungsstandards der GIS-Domäne.
- Verwenden des üblichen IP-basierten Übertragungsprotokolls HTTP.

#### Erwogene Optionen

1. [OGC API - Features](#)
2. [OGC Web Feature Service \(WFS\)](#)

#### Entscheidungsergebnis

Wir entschieden uns zur Verwendung von OGC API - Features aufgrund des im Gegensatz zu WFS einfacheren Datenzugriffs und der voraussichtlich leichtgewichtigeren Integrierbarkeit in Web-Anwendungen und Client-seitige Prozesse. Datenabfragen, Datenfilterung und Daten-Uploads erfolgen hierbei über HTTP REST mit in JSON/GeoJSON spezifizierten Inhalten.

#### Konsequenzen

- Gut, weil die Niedrigschwelligkeit der praktischen Verwendung von OGC API - Features in Kombination mit JSON-Objekten zu schneller Implementierung erster Funktionen auf Anwendungsseite der Projektpartner führt.
- Gut, weil die Spezifikation von OGC API - Features öffentlich zugänglich ist und auf Seite von OECON als Backend-Betreiber dadurch schnell implementiert und erweitert werden kann.
- Schlecht, weil OGC API - Features im Gegensatz zu WFS ein noch junger und unausgereifter Standard ist und es dadurch weniger Referenzimplementierungen zur Orientierung gibt, was in höherem Overhead bei der Eigenimplementierung resultieren kann.

- Schlecht, weil durch die Unausgereiftheit von OGC API - Features einige Basisfunktionalitäten auf Dienstseite ggf. noch nicht final standardisiert sind (Transaktionen und Koordinatensystemtransformationen, siehe unten).

### Weitere Informationen

Unsere UDM orientiert sich an dem 4-Layer-Modell der ETSI-standardisierten [Local Dynamic Map \(LDM\)](#), welches in [Towards a Semantically Enriched Local Dynamic Map](#) näher beschrieben wird. Statische und semi-statische Daten fallen nach dieser Definition in die Layer 1 und 2 einer LDM.

OGC API - Features unterstützt momentan noch nicht den vollen Funktionsumfang von WFS. Zum Beispiel wird die serverseitige, automatische Koordinatentransformation in andere Koordinatenreferenzsysteme als [WGS 84](#) im Core-Standard nicht betrachtet:

Implementations compliant with the Core are not required to support publishing feature geometries in coordinate reference systems [other than WGS 84](#) [...]

The Core also does not specify a capability to request feature geometries in a different coordinate reference system. Such a capability will be specified in another part of the OGC API Features series.

Diese Funktionalität zur Koordinatentransformation wird erst in der kürzlich veröffentlichten Erweiterung [OGC API - Features - Part 2: Coordinate Reference Systems by Reference](#) behandelt.

Der Verwendung von OGC API - Features mit *eigener* Server-Implementierung steht die Verwendung von ausgereiften, quelloffenen Referenzimplementierungen für WFS gegenüber. Ein Beispiel ist der [GeoServer](#), der eine automatische Koordinatentransformation nativ unterstützt und weitere hilfreiche Funktionen bereitstellt.

## E.2. ADR 002: OGC SensorThings API zum Übertragen dynamischer Messdaten

### Kontext und Problemstellung

Semi-dynamische und dynamische Messdaten mit einer Änderungscharakteristik von „minütlich/-sekündlich“ bis „fast in Echtzeit“ sollen durch Nutzer standardkonform in die UDM übertragen werden können. Weiterhin sollen bestimmte Daten-Themen von einem Nutzer abonniert werden können, um über Änderungen eines gemessenen Phänomens gezielt benachrichtigt zu werden.

### Entscheidungstreiber

- Kompatibilität zu einer vom LGV bereits für dynamische Daten der Urban Data Platform (UDP) verwendeten Technologie.
- Ermöglichen der Übertragung kleiner Datenmengen mit niedrigen Latenzen.
- Verwenden eines gängigen, IP-basierten Messaging-Protokolls der IoT-Domäne.
- Optimierte Unterstützung von Messdaten mit Raumbezug, um eine spätere räumliche Analyse, Fusion und Aggregation zu vereinfachen.

## Erwogene Optionen

1. OGC [SensorThings API](#) mit MQTT
2. Nur [MQTT](#) oder [AMQP](#)
3. Einfache Socket-Verbindung
4. [FIWARE](#) aus dem Smart-City-Umfeld

## Entscheidungsergebnis

Wir entschieden uns zur Verwendung des Standards OGC SensorThings API (STA) mit MQTT-Übertragungsweg, da STA zusätzlich zum reinen MQTT-, AMQP- oder Socket-Ansatz eine Datenstruktur zum Verwalten der Messdaten vorgibt, die uns beim Integrieren von Messdaten als Orientierung dienen soll.

Als quelloffene Referenzimplementierung der STA möchten wir den [FROST®-Server](#) verwenden, da er bereits GIS-Funktionen zum späteren Verarbeiten räumlicher Daten bereitstellt.

## Konsequenzen

- Gut, weil mit der quelloffenen Referenzimplementierung des FROST®-Servers der Mehraufwand einer Eigenimplementierung eines funktionsumfassenden STA-Servers stark reduziert wird, was unseren Einstieg erleichtert.
- Gut, weil das LGV bereits Erfahrung im Betrieb des FROST®-Servers besitzt, was eine einfachere Integration in die Urban Data Platform (UDP) der Stadt Hamburg in Aussicht stellt.
- Gut, weil bei considerIT die Datenübertragung vom Scooter zur UDM voraussichtlich ohne viel Mehraufwand STA-konform möglich sein wird.
- Neutral, weil die eigenständige Software-Komponente des FROST®-Servers einen Verwaltungsmehraufwand auf Backend-Seite bedeutet.

## Weitere Informationen

Unsere UDM orientiert sich an dem 4-Layer-Modell der ETSI-standardisierten [Local Dynamic Map \(LDM\)](#), welches in [Towards a Semantically Enriched Local Dynamic Map](#) näher beschrieben wird. Semi-dynamische und dynamische Messdaten fallen nach dieser Definition in die Layer 3 und 4 einer LDM.

FIWARE stellt nativ (noch) keinen eventgetriebenen Übertragungsweg bereit, sondern unterstützt zum aktuellen Zeitpunkt die Übertragung von Geo-Objekten über NGSI-LD nur über eine HTTP API. NGSI-LD in Version [1.6.1](#) bringt allerdings bereits eine neue MQTT API mit. Das offizielle Tutorial [IoT-over-MQTT](#) mag hier einen ersten Anreiz bieten.

## E.3. ADR 003: OGC Web Coverage Service zum Übertragen von Grid-Daten

**Achtung** Diese ADR 003 wird ersetzt durch ADR 010 und ADR 011!

## Kontext und Problemstellung

Statische bis semi-dynamische Raster-Daten mit einer Änderungscharakteristik von „monatlich“ bis „minütlich/sekündlich“ sollen durch Nutzer standardkonform aus der UDM sowie in die UDM übertragen werden können. Weiterhin sollen UDM-seitig andere dynamische Datenquellen gerastert aggregiert werden können, um anschließend über dieselben Standardschnittstellen als Rasterdaten bereitgestellt zu werden.

## Entscheidungstreiber

- Bereits im proprietären Datenformat vorliegende Regenradardaten sollen zeitnah in die UDM eingespielt werden können.
- Verwenden etablierter und offener Datenformate und Übertragungsstandards der GIS-Domäne.
- Möglichkeit zur niedrighwelligen und flexiblen Erweiterung um weitere thematische Raster-Layer mit unterschiedlichen Datentypen, Band-Definitionen und Auflösungen.
- Verwenden des üblichen IP-basierten Übertragungsprotokolls HTTP.

## Erwogene Optionen

1. OGC [Web Coverage Service \(WCS\)](#)
2. OGC [API - Coverages](#)

## Entscheidungsergebnis

Wir entschieden uns zur Verwendung des ausgereiften Standards OGC Web Coverage Service (WCS) aufgrund der Möglichkeit zur transaktionellen Datenübertragung in Richtung des Servers über [WCS Transaction Extension \(WCS-T\)](#). OGC API - Coverages bietet momentan noch keine transaktionelle Datenübertragung.

Als quelloffene Referenzimplementierung von WCS möchten wir [rasdaman](#) verwenden. rasdaman ist weiterhin die momentan einzige Implementierung, die WCS-T vollständig unterstützt.

## Konsequenzen

- Gut, weil mit der quelloffenen Referenzimplementierung von rasdaman der Mehraufwand einer Eigenimplementierung eines funktionsumfassenden WCS-Servers stark reduziert wird, was unseren Einstieg erleichtert.
- Gut, weil rasdaman darauf ausgelegt ist, zeitlich veränderliche Rasterdaten automatisiert zu prozessieren und in die Gesamtdatenbasis zu integrieren.
- Gut, weil rasdaman die WCS-konforme Datenbereitstellung über HTTP ermöglicht.
- Gut, weil die meisten WCS-Implementierungen auch gleichzeitig eine Web-Map-Service-Schnittstelle ([WMS](#)) zur standardisierten *Darstellung* der Rasterdaten in Web-basierten Kartenanwendungen beinhalten.
- Neutral, weil die eigenständige Software-Komponente von rasdaman einen Verwaltungsmehraufwand auf Backend-Seite bedeutet.

## Weitere Informationen

Unsere UDM orientiert sich an dem 4-Layer-Modell der ETSI-standardisierten [Local Dynamic Map \(LDM\)](#), welches in [Towards a Semantically Enriched Local Dynamic Map](#) näher beschrieben wird. Statische bis semi-dynamische Raster-Daten fallen nach dieser Definition in die Layer 1 bis 3 einer LDM.

Eine Alternative zu rasdaman kann der GeoServer mit der [ImageMosaic-Erweiterung](#) sein. Dort können auch per REST API neue Rasterkacheln hochgeladen und mit einem `TimeStamp` in ein zeitlich veränderliches, dynamisches Raster geschrieben werden. Diese Rasterdaten werden dann automatisch über die WMS- und WCS-Schnittstelle des GeoServers bereitgestellt. Im weiteren Projektverlauf muss evaluiert werden, ob dies vielleicht der schlankere Lösungsweg ist. Andere dynamische Datenquellen könnten dann datenbankseitig in PostGIS zu Rastern aggregiert und ebenfalls nativ mit GeoServer über WMS/WCS bereitgestellt werden.

## E.4. ADR 004: AMQP zum Übertragen von V2X-Nachrichten

### Kontext und Problemstellung

Dynamische V2X-Nachrichten (CPM und CAM) mit einer Änderungscharakteristik von „fast in Echtzeit“ sollen durch Nutzer standardkonform über eine IP-basierte Schnittstelle in die UDM übertragen werden können.

### Entscheidungstreiber

- Das Datenmodell von V2X-Nachrichten ist durch den jeweilig verwendeten ETSI-Standard bereits vorgegeben.
- Die Datenübertragung zur UDM soll mit möglichst niedriger Latenz erfolgen.
- Wir möchten auf gleiche Weise die PER-kodierten Originalnachrichten sowie bereits clientseitig im Vorfeld entpackte Nachrichten als XML übertragen können, um deren Inhalte UDM-seitig direkt verarbeiten zu können.
- Verwenden eines gängigen, IP-basierten Messaging-Protokolls der IoT-Domäne.

### Erwogene Optionen

1. [AMQP](#)
2. [MQTT](#)
3. [OGC SensorThings API \(STA\)](#) mit [MQTT](#)

### Entscheidungsergebnis

Wir entschieden uns zur Verwendung von AMQP aufgrund der Möglichkeit einer Filterung des Datenstrominhalts, die mit MQTT nicht gegeben ist. [Exchanges und Exchange Types](#) vereinfachen mit AMQP das Routing von Nachrichten an vordefinierte Queues.

Da in erster Linie Nachrichteninhalte im ETSI-definierten Format an die UDM übertragen werden müssen, würde die OGC SensorThings API durch ihre vordefinierte Datenstruktur einen

unnötigen Overhead darstellen und keinen Vorteil bieten.

Als Implementierung von AMQP bietet sich das freie [RabbitMQ](#) an.

Als AMQP-Version ist 0.9.1 zu verwenden, da für diese etablierte Version mehr Programmibliotheken und Werkzeuge vorhanden sind, als für die neuere Version 1.0.0. Weiterhin behandelt Version 1.0.0 hauptsächlich das Message-Encoding ohne Änderungen an der Semantik.

### Konsequenzen

- Gut, weil OECON als Backend-Betreiber bereits Erfahrung mit AMQP aufweist.
- Gut, weil mit AMQP entpackte Nachrichten in XML übertragen werden können, was die Beibehaltung der eindeutigen Repräsentation der V2X-ASN1-Definition auch im entpackten Zustand ermöglicht.
- Schlecht, weil AMQP den größeren Protokoll-Overhead als MQTT mitbringt.

### Weitere Informationen

Unsere UDM orientiert sich an dem 4-Layer-Modell der ETSI-standardisierten [Local Dynamic Map \(LDM\)](#), welches in [Towards a Semantically Enriched Local Dynamic Map](#) näher beschrieben wird. Dynamische V2X-Nachrichten fallen nach dieser Definition in den Layer 4 einer LDM.

Im späteren Projektverlauf kann auf ein vorgelagertes, clientseitiges Entpacken der V2X-Nachrichten verzichtet werden, sodass nur noch PER-kodierte Originalnachrichten zur UDM übertragen werden müssen. Das Entpacken und Verarbeiten der Nachrichten wird dann Backendseitig erfolgen.

Im späteren Projektverlauf muss erneut evaluiert werden, ob die entscheidungstreibenden Vorteile von AMQP im Gegensatz zu MQTT – primär die Filtermöglichkeit der Datenströme – in der Praxis verwendet werden. Falls nicht, kann die Komplexität der Gesamtarchitektur reduziert werden, indem die AMQP-Infrastruktur gegen OGC SensorThings API mit MQTT ersetzt wird, was bereits durch ADR 002 abgedeckt ist.

## E.5. ADR 005: Geodätisches Koordinatenreferenzsystem für Vektordaten auf Datenhaltungsseite

### Kontext und Problemstellung

Geodaten in *Vektordarstellung* sollen in der UDM abgelegt und über Schnittstellen zugreifbar sein. Das zugrundeliegende Koordinatenreferenzsystem der Daten muss über alle Dienste hinweg möglichst eindeutig sein. Etwaige Koordinatensystemtransformationen durch standardisierte Methoden der GIS-Domäne sollen UDM-seitig erfolgen.

### Entscheidungstreiber

- Schnelles Aufsetzen eines ersten Prototyps zum Übertragen amtlicher Verkehrsinfrastrukturdaten (Straßenschilder) aus der UDM über ins Fahrzeug der HAW für die Anwendung der Selbstlokalisierung.
- Verwenden des Datenübertragungsstandards OGC API Features der GIS-Domäne.

- Amtliche Vorgabe zu verwendender Koordinatenreferenzsysteme im europäischen Raum.

### Erwogene Optionen

1. Geodätisches Koordinatenreferenzsystem mit geografischen Koordinaten in Länge, Breite und Ellipsoidhöhe basierend auf [ETRS89](#) bzw. [WGS 84](#).
2. Projiziertes Koordinatenreferenzsystem [ETRS89 / UTM Zone 32N](#) mit Kartesischen Koordinaten in Rechtswert, Hochwert und Ellipsoid-/NHN-Höhe.

### Entscheidungsergebnis

Wir entschieden uns zur Verwendung des geodätischen Koordinatenreferenzsystems WGS 84 in Anlehnung an den von uns frühzeitig in Use Case 2/User Story 2.2 implementierten Standard OGC API - Features - Part 1: Core in Version 1.0.1:

The *Core* is intended to be a minimal useful API for fine-grained read-access to a spatial dataset where geometries are represented in the coordinate reference system WGS 84 with axis order longitude/latitude. ([Abschnitt 2](#))

**Konsequenzen** Unsere aktuelle UDM-seitige Implementierung von OGC API - Features unterstützt noch keine ad hoc-Koordinatensystemtransformation. Die Daten müssen daher auf Datenhaltungsseite bereits in WGS 84 referenziert vorliegen. Amtliche Daten der FHH, die häufig in projizierten UTM-Koordinaten (ETRS89 / UTM Zone 32N) vorliegen, müssen daher im Vorfeld für den Datenaustausch über die UDM transformiert werden.

### Weitere Informationen

Die Verwendung einer anderen Softwarekomponente in produktiver Umgebung mit Unterstützung für ad hoc-Koordinatentransformationen bietet mehr Flexibilität und erhöhte Interoperabilität bei der Wahl der Koordinatensysteme. Ein Beispiel ist der quelloffene [GeoServer](#), der eine automatische Koordinatentransformation nativ unterstützt und weitere hilfreiche Funktionen bereitstellt.

## E.6. ADR 006: CAM-Version 1.4.1

### Kontext und Problemstellung

V2X-Nachrichten vom Typ Cooperative Awareness Messages (CAM) sollen zwischen Nutzern und der UDM übertragen werden. Dafür ist die zu implementierende CAM-Version festzulegen.

### Entscheidungstreiber

- Die zu verwendende CAM-Version soll mit möglichst niedrigem Aufwand von Anwendungen der Projektpartner DLR, CIT und LSBG unterstützt werden können.
- Die zu verwendende CAM-Version soll mit möglichst niedrigem Aufwand auf dem UDM-System des Projektpartners OECON ausgerollt werden können.

## Erwogene Optionen

- Aktuellste CAM-Version ETSI EN 302 637-2 v1.4.1
- ältere CAM-Versionen

## Entscheidungsergebnis

Wir entschieden uns zur Verwendung der aktuellsten CAM-Version 1.4.1, da dies die am wahrscheinlichsten von den meisten Verkehrsteilnehmern verwendete Version sein wird. Alle betroffenen Projektpartner stimmten der Verwendung dieser Version zu.

## Weitere Informationen

- [Spezifikation](#) für ETSI EN 302 637-2 v1.4.1
- [Code-Repository](#) für ETSI EN 302 637-2 v1.4.1

## E.7. ADR 007: CPM-Version 2.1.1

### Kontext und Problemstellung

V2X-Nachrichten vom Typ Collective Perception Message (CPM) sollen zwischen Nutzern und der UDM übertragen werden. Dafür ist die zu implementierende CPM-Version festzulegen.

### Entscheidungstreiber

- Die zu verwendende CPM-Version soll mit möglichst niedrigem Aufwand von Anwendungen der Projektpartner DLR, CIT und LSBG unterstützt werden können.
- Die zu verwendende CPM-Version soll mit möglichst niedrigem Aufwand auf dem UDM-System des Projektpartners OECON ausgerollt werden können.

## Erwogene Optionen

- Aktuellste CPM-Version ETSI TS 103 324 v2.1.1
- ältere CPM-Versionen

## Entscheidungsergebnis

Wir entschieden uns zur Verwendung der aktuellsten CPM-Version 2.1.1, da dies die am wahrscheinlichsten von den meisten Verkehrsteilnehmern verwendete Version sein wird. Alle betroffenen Projektpartner stimmten der Verwendung dieser Version zu, obwohl OECON serverseitig das Dekodieren binär-kodierter CPM-Nachrichten noch nicht implementiert hat.

**Konsequenzen** OECON wird im weiteren Projektverlauf den eigenen ASN.1-Compiler für die Verarbeitung von CPM-Nachrichten erweitern müssen.

## Weitere Informationen

- [Spezifikation](#) für ETSI TS 103 324 v2.1.1
- [Code-Repository](#) für ETSI TS 103 324 v2.1.1

## E.8. ADR 008: Apache Flink für Aggregation dynamischer Daten

### Kontext und Problemstellung

Dynamische V2X-Nachrichten (CPM, CAM, DENM) sollen von einem Verarbeitungsprozess vom AMQP-Broker (siehe ADR 004) konsumiert und raum-zeitlich aggregiert werden können. Dieselbe Methodik soll auch auf dynamische Sensordaten von Scootern und Fahrrädern anwendbar sein.

### Entscheidungstreiber

- Framework für streambasierte Datenverarbeitung
- Eigenentwicklungsaufwand möglichst gering halten
- Gute Entwicklerdokumentation der Open-Source-Lösung mit aktiver Community und Beispielen
- Verbreitete und von den Entwicklern bevorzugte Programmiersprache
- Flexibilität bei der Wahl der Schnittstellen für zu aggregierende Eingangsdaten
- Möglichkeit zur Persistierung der Aggregations-Ergebnisse in PostGIS für komfortable Direkt-Bereitstellung über OGC-Web-Schnittstellen durch GeoServer oder die EDDY-Eigenentwicklung des OGC-API-Features-Servers

### Erwogene Optionen

- [Apache Flink](#)
- [Apache StreamPipes](#)
- [Windmill](#)

### Entscheidungsergebnis

Es wurde Apache Flink gewählt, da es nativ RabbitMQ/AMQP als Quelle unterstützt und auch nativ Daten in PostgreSQL/PostGIS speichern kann. Die Implementierung erfolgt in der Programmiersprache Java, welche vom umsetzungsverantwortlichen Projektpartner DLR bevorzugt wird. Die Community ist sehr aktiv mit guter Entwickler-Dokumentation und vielen Tutorials. Viele Code-Beispiele können 1:1 verwendet werden. Die Aggregationsfunktionalitäten sind sehr umfangreich und einfach anpassbar.

Erste Gehversuche mit Apache StreamPipes waren schwerfällig. Es lief instabil, war über die im Vordergrund stehende GUI nicht ausreichend flexibel konfigurierbar und die Dokumentation zur Entwicklung eigener Quellen/Senken war nicht ausreichend. Die in Aussicht gestellte Unterstützung der OGC SensorThings API als Quelle war in Q2/2024 noch nicht verfügbar.

Windmill ist eher auf Verarbeitung von Social-Media-Inhalten zugeschnitten. Eine Erweiterung für EDDY-spezifische Datenschnittstellen erschien komplexer als mit Apache Flink. Weiterhin erfolgt die Implementierung eigener Prozesse in Python, was für komplexere Problemstellungen und zielführendes Debugging umständlich ist. Die nativ bereitgestellten raum-zeitlichen Aggregationsmöglichkeiten sind im Vergleich zu Flink wesentlich weniger ausgereift.

### **Weitere Informationen**

Mit Apache Flink können sowohl V2X-Daten über RabbitMQ als auch Sensordaten über OGC SensorThings API auf ähnliche Weise im Streaming-Prozess verarbeitet und aggregiert werden.

Weiterhin stellt dieses Framework auch eine elegante Möglichkeit in Aussicht, regelmäßig aktualisierte Regenradar Daten des DWD über dessen WCS-Schnittstelle herunterzuladen, zwischenspeichern und über einen GeoServer selbst bereitzustellen.

## **E.9. ADR 009: ROS-Punktwolkenmodell zum Übertragen von LiDAR-Daten als FlatBuffers**

### **Kontext und Problemstellung**

Semi-dynamische Punktwolken Daten mit einer Änderungscharakteristik von „minütlich/sekündlich“ sollen von Fahrzeugen zur Eigenlokalisierung über eine internetbasierte REST-Schnittstelle aus der UDM sowie in die UDM übertragen werden können.

### **Entscheidungstreiber**

- Verwendung komprimierter Binärdaten, um die zu übertragenden Datenmengen klein zu halten.
- Unterstützung von gängigen und möglichst plattformunabhängigen Programm Bibliotheken für die Serialisierung.
- Kompatibilität zu den Fahrzeugsystemen des DLR und der HAW.

### **Erwogene Optionen**

- [Punktwolkenmodell des Robot Operating System \(ROS\)](#) mit binärer Kodierung in [FlatBuffers](#)
- [Cloud-Optimized Point Cloud \(COPC\)](#) v1.0

### **Entscheidungsergebnis**

Wir entschieden uns für das Punktwolkenmodell des Robot Operating System (ROS) mit binärer Kodierung in FlatBuffers, da beide Partner DLR und HAW fahrzeugseitig mit ROS arbeiten und auf diese Weise die konzeptionelle Integration am einfachsten erschien.

### **Konsequenzen**

- Gut, weil FlatBuffers für performance-kritische Umgebungen optimiert ist.

- Gut, weil FlatBuffers quelloffen ist und eine Vielzahl unterschiedlicher Programmiersprachen unterstützt.
- Neutral, weil das ROS-basierte Punktwolkendatenmodell aus EDDY-Perspektive nicht unbedingt größtmögliche Kompatibilität verspricht. COPC ermöglicht generischere Verwendung der Punktdaten in unterschiedlichen Anwendungen.

### **Weitere Informationen**

Die Generierung und Verarbeitung von COPC für die Übertragung aus den Fahrzeugen und die Prozessierung zu einer Gesamtpunktwolke auf Server-Seite stellte sich nach ersten Analysen als komplexer und leistungshungriger als die ROS-Variante heraus. So benötigt COPC bspw. auf Klient- und Server-Seite die umfangreiche Abhängigkeit der Point Data Abstraction Library (PDAL). Weiterhin arbeitet ROS intern mit 32-Bit-Punktkoordinaten mit zusätzlicher affiner Transformation zur globalen Verortung der Punkte. Es wird vermutet, dass die zur Verwendung im Fahrzeug und Server mehrfach notwendige Konvertierung in die Koordinatendarstellung von COPC zu Laufzeitverlusten führt.

Für einen zukünftigen LiDAR-Punktwolken-Service mit erhöhtem TRL in produktiver Nutzung sollte die Option von COPC erneut evaluiert werden, da COPC weiterhin größtmögliche Kompatibilität für unterschiedliche Nutzer und Systeme verspricht. Auch bei COPC steht generell der Performance-Gedanke im Vordergrund, allerdings primär aus GIS-Perspektive, die weniger hohe Laufzeitanforderungen als die Fahrzeug-Domäne stellt.

## **E.10. ADR 010: OGC Web Coverage Service zum Bereitstellen von Regenradar­daten über GeoServer**

### **Kontext und Problemstellung**

Statische bis semi-dynamische Raster-Daten mit einer Änderungscharakteristik von „monatlich“ bis „minütlich/sekündlich“ sollen standardkonform durch die UDM bereitgestellt werden können. Hauptanwendungsfall sind die Regenradar­daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD), die momentan für 5-minütige Zeitabschnitte vorliegen und in der UDM zwischengespeichert werden sollen. Dieselbe Schnittstelle soll aber auch für bspw. digitale Orthofotos oder Geländemodelle verwendbar sein.

### **Entscheidungstreiber**

- Bereits im proprietären Datenformat vorliegende Regenradar­daten sollen zeitnah in die UDM eingespielt werden können.
- Verwenden etablierter und offener Datenformate und Übertragungsstandards der GIS-Domäne.
- Verwenden des üblichen IP-basierten Übertragungsprotokolls HTTP.
- Möglichkeit zur niedrigschwelligen und flexiblen Erweiterung um weitere thematische Raster-Layer mit unterschiedlichen Datentypen, Band-Definitionen und Auflösungen.

## Erwogene Optionen

1. OGC [Web Coverage Service \(WCS\)](#)
2. OGC [API - Coverages](#)
3. [GeoServer](#) als Implementierung
4. [rasdaman](#) als Implementierung

## Entscheidungsergebnis

Wir entschieden uns zur Verwendung des Standards OGC Web Coverage Service (WCS), da dieser im Gegensatz zu API Coverages ausgereifter ist und von einer breiteren Palette an quelloffenen Servern unterstützt wird. Die Umsetzung soll mit GeoServer erfolgen.

## Konsequenzen

- Gut, weil mit dem quelloffenen GeoServer der Mehraufwand einer Eigenimplementierung eines funktionsumfassenden WCS-Servers reduziert wird.
- Gut, weil GeoServer die WCS-konforme Datenbereitstellung über HTTP ermöglicht.
- Gut, weil GeoServer auch gleichzeitig eine Web-Map-Service-Schnittstelle ([WMS](#)) zur standardisierten *Darstellung* der Rasterdaten in Web-basierten Kartenanwendungen beinhaltet.
- Neutral, weil die eigenständige Software-Komponente von GeoServer einen Verwaltungsmehraufwand auf Backend-Seite bedeutet.

## Weitere Informationen

Die im Vorfeld mit ADR 003 in Erwägung gezogene Verwendung der quelloffenen Referenzimplementierung des WCS durch rasdaman wurde verworfen, da sich die Konfiguration von rasdaman als zu schwierig erwiesen hat. rasdaman ist zwar weiterhin die momentan einzige Implementierung, die WCS-T (WCS mit Transaktion/„Hochladefunktion“) vollständig unterstützt, aber WCS-T wird im aktuellen Konzept nicht mehr für das Hochladen von Regenradardaten in die UDM benötigt. Stattdessen kann ein Apache-Flink-Job implementiert werden, der die Regenradardaten regelmäßig vom DWD abfragt und direkt in einen [ImageMosaic](#)-Datenspeicher des GeoServers speichert. Der GeoServer stellt diesen Datenspeicher dann als Layer über den konventionellen WCS bereit. Apache Flink wird in ADR 008 erläutert.

## E.11. ADR 011: H3-DGGS-Vektormodell für statistische Aggregation

### Kontext und Problemstellung

Semi-dynamische und dynamische Sensordaten mit einer Änderungscharakteristik von „minütlich/sekündlich“ bis „millisekündlich“ sollen in vordefinierten Zeitfenstern räumlich aggregiert und standardkonform durch die UDM als Grid-Zellen bereitgestellt werden können. Als Sensordaten kommen ans Backend gesendete V2X-Nachrichten sowie Scooter- bzw. Fahrraddaten infrage. Die statistische Aggregation soll Aussagen zu Verkehrsstärken, mittleren Geschwindigkeiten und kritischen Verkehrsknoten ermöglichen.

## Entscheidungstreiber

- Größe der Gitterzellen soll variabel sein, um unterschiedliche thematische Gitter/Raster erstellen zu können.
- Bereitstellung der Ergebnisdaten soll möglichst über bereits anderweitig im Projekt verwendete Geodaten-Schnittstellen (WMS/WFS) erfolgen können.
- Modellierung der Gitterzellen entweder
  - als Bild-Raster mit unterschiedlichen Bändern für die statistischen Werte oder
  - als Vektormodell mit Polygon-Geometrien und Attributtabelle.
- Räumliche Vergleichbarkeit unterschiedlicher Aggregationsdatensätze.

## Erwogene Optionen

- [H3](#) von Uber als hexagonales, hierarchisches Discrete Global Grid System (DGGS)
- [S2](#) von Google als quadratisches, hierarchisches Discrete Global Grid System (DGGS)
- Konventionelles, rechteckiges Gitter/Raster mit beliebigem Ursprung und manuell definierter Zellgröße

## Entscheidungsergebnis

Wir entschieden uns zur Verwendung von H3, da es durch die hexagonalen Polygone im Gegensatz zu S2 „moderner“ wirkt und vor allem häufig bei Web-Visualisierungen zum Einsatz kommt.

## Konsequenzen

- Gut, weil sowohl H3 als auch S2 quelloffen sind und bereits von vielen Werkzeugen unterstützt werden und Programmbibliotheken für verschiedene Programmiersprachen existieren.
- Gut, weil sowohl H3 als auch S2 eine Hierarchie definieren und es dadurch ermöglichen, den Raum durch eindeutige Zellen auf unterschiedlichen Auflösungsebenen zu indizieren.
- Gut, da durch die Verwendung dieser Hierarchie und Zelleindeutigkeit thematisch unterschiedliche Datensätze auf räumlicher Ebene einfacher vergleichbar sind.
- Gut, weil die Indizierung des Raums unabhängig von landestypischen, projizierten 2D-Koordinatenreferenzsystemen erfolgt und dadurch ein einheitliches Vorgehen für europäische Partner erreicht wird.
- Gut, weil die Definition geeigneter Zellgrößen/Auflösungen für unsere thematisch unterschiedlichen Aggregationen erleichtert wird, da sowohl H3 als auch S2 die Zellgröße/Auflösung vorgeben.
- Gut, weil Ergebnisdaten von Aggregationen im Vektor-Modell ad hoc über bereits anderweitig im Projekt verwendete Schnittstellen wie WFS oder API Features bereitgestellt werden können (siehe ADR 001).

## Weitere Informationen

Die im Vorfeld mit ADR 003 in Erwägung gezogene Umsetzung von Aggregationen im *kontinuierlichen Rastermodell* mit unterschiedlichen Datentypen, Band-Definitionen und Auflösungen wurde verworfen. Stattdessen wird ein polygonbasiertes Vektormodell verwendet, welches durch hexagonale Gitterzellen die räumliche Aufteilung vorgibt. Beweggründe

- Eine allgemeingültige Definition eines Rastermodells mit Zellgröße und Gitterursprung war bis zuletzt nicht trivial. Bei metrischen Zellen ist die Wahl eines projizierten Koordinatenreferenzsystems entscheidend und gleichzeitig räumlich variable, was die Verwendung im europäischen Kontext erschwert (bspw. durch unterschiedliche UTM-Zonen). Weichen die Auflösungen unterschiedlicher Layer voneinander ab, wird eine räumliche Vergleichbarkeit erschwert. H3 und S2 geben diese Parameter vor, was die Gitter-Definition erleichtert und gleichzeitig eine räumliche Vergleichbarkeit von Datensätzen sicherstellt.
- Die Verwendung eines Vektormodells ist in der Implementierung flexibler als die eines Rastermodells und erleichtert es, abhängig von Fragestellung und Thema unterschiedliche Werte in einer Gitterzelle darzustellen.
- Die statistische Aggregation wurde mit Apache Flink als Streaming-Daten-Prozess umgesetzt (siehe ADR 008). Bei Stream-basierter Verarbeitung ist die Verwendung von dedizierten Polygon-Vektor-Objekten als Aggregationszellen einfacher, als in einem Rastermodell mit kontinuierlichen Gitterzellen zu arbeiten.
- Das Vektormodell orientiert sich am objektorientierten Programmierparadigma, welches die Modellierung von Daten in relationalen Datenbanken ermöglicht. Auf diese Weise können unsere aggregierten Daten sehr flexibel mit räumlichen SQL-Funktionen auf Datenbankebene verarbeitet werden. Dies erleichtert das Datenmanagement großer Daten und ist der Performance zuträglich.

Für weitere Hintergrundinformationen zu DGGS siehe [Geospatial Indexing and Partitioning in Grid Systems](#).

## F. Austausch mit mFUND-Projekt INFRASense

Über den mFUND-Kontext sind wir auf das Projekt [INFRASense](#) aufmerksam geworden, welches auf dem Vorgängerprojekt [ECOSense](#) basiert. Die Projektinhalte von INFRASense überschneiden sich in Bezug auf die Verarbeitung und kartografische Darstellung dynamischer Sensordaten von Scootern/Fahrrädern mit denen von EDDY. Vordergründig ist die Erfassung von Straßenqualitätszuständen von Radwegen. Eine technische Evaluierung der Konzepte und Systemarchitektur von INFRASense war aufgrund mangelnder öffentlich einsehbarer Ressourcen nicht möglich. Allerdings konnten durch digitale Teilnahme an der INFRASense-Abschlussveranstaltung am 21.10.2024 und in einer Videokonferenz zwischen LSBG, DLR und Daniel Schlitt von der worldiety GmbH am 29.10.2024 tiefere Einblicke gesammelt werden.

Der Hauptunterschied besteht darin, dass INFRASense 4 dedizierte Crowd-Sourcing-Datenerhebungskampagnen in Oldenburg durchgeführt hat, um fertige Auswertungsprodukte daraus

abzuleiten. (Deutschlandweite Daten sind bereits im [BIQEmonitor](#) einsehbar.) Dafür wurden freiwillig teilnehmende Radfahrer mit speziell entwickelten Sensor-Boxen ausgestattet. Auch wurde eine eigene Mobil-App entwickelt, die Daten aufzeichnen kann. Bei EDDY hingegen steht die Entwicklung einer standardkonformen, offenen Datenplattform im Vordergrund, die eine *permanente* und flächendeckende Datenerfassung über die Zeit ermöglichen soll. Dies könnte dann als ein kommunaler Basisdienst betrieben werden.

Zwar ist die INFRASense-Architektur angeblich auch dafür ausgelegt, kontinuierlich Daten zu sammeln und automatisch zu verarbeiten, allerdings scheint die API für den Datenzugriff projektspezifisch und nicht standardisiert zu sein. Hier könnte zukünftiger Austausch mit unserer EDDY-Architektur einen Mehrwert leisten, um INFRASense-Daten über Standard-Schnittstellen verteilen zu können und somit einem breiteren Anwendungsspektrum zugänglich zu machen. Umgekehrt könnte EDDY von den in INFRASense bereits weit fortgeschrittenen Datenauswertungsverfahren und Visualisierungsmethoden profitieren.

Die worldiety GmbH hat generelles Kooperationsinteresse aus dem Projekt INFRASense bekundet, auch mit der Option, die INFRASense-Datenverarbeitungskette als Open-Source-Software offenzulegen, um eine breitere Nutzung zu ermöglichen. Dabei müssen allerdings etwaige Geschäftsmodelle der beteiligten Projektpartner berücksichtigt werden. Außerdem bedarf eine nachhaltig durchgeführte Offenlegung von Software eines erweiterten Arbeitsaufwands.