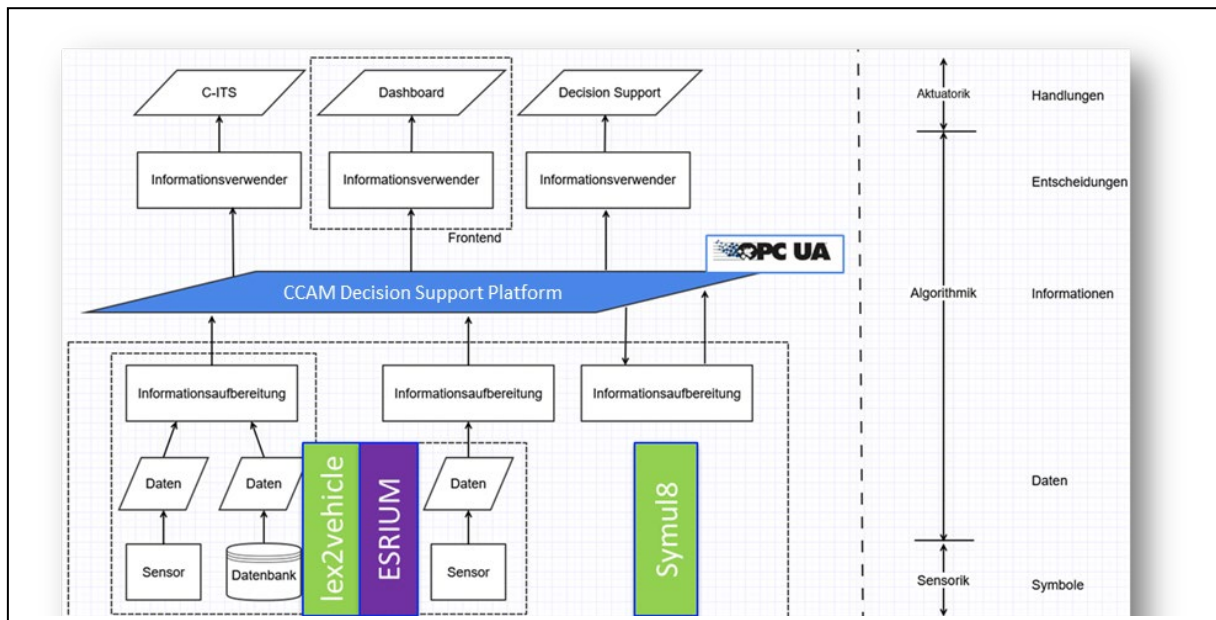


# Digitaler Zwilling des Verkehrssystems Straße (DIGEST)

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
D-A-CH Kooperation  
Verkehrsinfrastrukturforschung 2020  
**DACH 2020**

März 2023

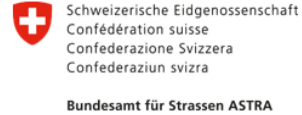




Bundesministerium  
für Digitales  
und Verkehr



Bundesministerium  
Klimaschutz, Umwelt,  
Energie, Mobilität,  
Innovation und Technologie



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra  
  
Bundesamt für Strassen ASTRA



## Impressum:

### Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV)  
Invalidenstraße 44  
10115 Berlin  
Deutschland



Bundesministerium  
für Digitales  
und Verkehr

Bundesministerium für Klimaschutz (BMK)  
Radetzkystraße 2  
1030 Wien  
Österreich



Bundesministerium  
Klimaschutz, Umwelt,  
Energie, Mobilität,  
Innovation und Technologie

Bundesamt für Strassen (ASTRA)  
Papiermühlestrasse 13  
3063 Ittigen  
Schweiz



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Bundesamt für Strassen ASTRA

### Für den Inhalt verantwortlich:

FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH  
Roseggerstraße 15  
4600 Wels



UNIVERSITY  
OF APPLIED SCIENCES  
UPPER AUSTRIA

### Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH  
Thematische Programme  
Sensengasse 1  
1090 Wien  
Österreich



FFG  
Forschung wirkt.

# Digitaler Zwilling des Verkehrssystems Straße (DIGEST)

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
D-A-CH Kooperation  
Verkehrsinfrastrukturforschung 2020  
DACH 2020

## Autorinnen und Autoren:

**FH-Prof. Dr. Wolfgang SCHILDORFER**

**FH-Prof. Dr. Matthias NEUBAUER**

**Dr. Walter AIGNER**

**Dr. Andreas KUHN**

**Dr. Elvira THONHOFER**

**Dr. Martin FISCHER**

**Dr. Simon SIGL**

**DI Sandra ULRICH**

## Auftraggeber:

Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Deutschland

Bundesministerium für Klimaschutz, Österreich

Bundesamt für Strassen, Schweiz

## **Auftragnehmer:**

FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH  
Roseggerstraße 15  
4600 Wels

Vereinigung High Tech Marketing  
Lothringerstraße 14/6  
1030 Wien

ANDATA GmbH  
Hallburgstraße 5  
5400 Hallein

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)  
Linder Höhe  
51147 Köln

ARNDT IDC GmbH & Co. KG  
Wandsbeker Allee 77  
DEU 22041 Hamburg

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>KURZFASSUNG</b> .....	9
<b>1. EINLEITUNG</b> .....	11
<b>2. PROJEKTZIELE</b> .....	12
<b>3. PROJEKTERGEBNISSE und TÄTIGKEITEN</b> .....	14
<b>3.1. Stakeholderanalyse</b> .....	14
<b>3.2. Konzeptentwicklung</b> .....	23
3.2.1. Anforderungsanalyse.....	23
3.2.2. Information als Inhalt des Digitalen Zwillings .....	24
3.2.3. Informationsmodellierung .....	26
3.2.4. Ungelöste Probleme und Kritik an bestehenden Ansätzen.....	29
3.2.5. Anforderungen an eine technische Realisierung .....	32
3.2.6. Relevante Technologien .....	34
3.2.7. Umsetzung der Architektur im Projekt .....	36
3.2.8. Abgleich Architekturkonzept mit den Anforderungen.....	38
3.2.9. Validierung des Konzepts .....	41
<b>3.3. Rollenmodell</b> .....	42
3.3.1. CCAM DSP User .....	45
3.3.2. Frontend Developer .....	46
3.3.3. Standardization Body.....	47
3.3.4. Backend Developer .....	48
3.3.5. Sensor/Infrastructure Operator .....	49
3.3.6. CCAM DSP Manufacturer.....	50
3.3.7. CCAM DSP Operator.....	51
3.3.8. Gegenüberstellung der Rollen zu den Anforderungen.....	52
<b>3.4. Demonstratoren</b> .....	54
3.4.1. Demonstrator A10 – Tunnelbaustelle .....	56
3.4.2. Demonstrator A10 – Relevante Informationsgruppen.....	56
3.4.3. Demonstrator A10 - Informationsmodell .....	58
3.4.4. Demonstrator A10 – Backend Architektur.....	64
3.4.5. Demonstrator A10 - Technische Umsetzung, Toolchain.....	67
3.4.6. Demonstrator Testfeld Niedersachsen .....	77

3.4.7. Übergaben .....	87
<b>3.5. Betreibermodell .....</b>	<b>89</b>
<b>3.6. Dissemination .....</b>	<b>98</b>
<b>4. NÄCHSTE SCHRITTE FÜR DIE UMSETZUNG DES DIGEST KONZEPTEDES .....</b>	<b>100</b>
<b>REFERENZEN UND QUELLEN .....</b>	<b>107</b>
<b>ANHANG .....</b>	<b>108</b>
Interviews und Workshops im Rahmen der Stakeholderanalyse in DIGEST ..	109
<b>BEILAGEN .....</b>	<b>113</b>
UNPUBLISHED: IEEE-Paper „Infrastructure-based digital twins for cooperative, connected, automated driving and smart road services .....	114
Informationsmodell Demonstratoren A2_A9_A10 NodeSet2 .....	115
Demonstrator Testfeld Niedersachsen Informationsmodell VMZ Nodeset2 ...	116
Demonstrator Testfeld Niedersachsen Technische Dokumentation .....	117
CCAM Decision Support Platform Non-Paper (Englisch) .....	118

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1 Wesentliche Entitäten für Digitale Zwillinge .....	15
Abbildung 2 Kontextmodell Infrastrukturbezogene Stakeholder .....	16
Abbildung 3 Kontextmodell Verkehrsteilnehmerbezogene Stakeholder .....	17
Abbildung 4 Kontextmodell Sonstige Stakeholder.....	18
Abbildung 5 Generische Datenbasis für Kontextmodelle .....	19
Abbildung 6 Kontextmodelle.....	19
Abbildung 7 Funktionsmodelle und die Einbettung eines Digitalen Zwillings .....	21
Abbildung 8 Beispielhaftes Ausführungsszenario und abgeleitetes Anforderungsmodell .....	21
Abbildung 9 Wissenspyramide, angelehnt an [1] Ackoff, 1989.....	24
Abbildung 10 Anforderungen für technische Umsetzung eines Digitalen Zwillings .....	33
Abbildung 11 Architekturkonzept Digitaler Zwilling in DIGEST.....	36
Abbildung 12 Rollenmodell eines DZ/CCAM DSP in DIGEST.....	42
Abbildung 13 Rollendarstellung und Mapping der Verantwortlichkeiten in Betrieb, Herstellung und Standardisierung .....	44
Abbildung 14 Schematische Darstellung der drei umgesetzten Demonstratoren (aus Thonhofer et al. [23]) .....	54
Abbildung 15 Bereich der A10 Tunnelbaustelle: Ofenauer Tunnel (links unten) bis Hiefler Tunnel (rechts oben).....	56
Abbildung 16 Fahrstreifencodierung gemäß Datex II (Quelle: AustrianPlannedEventsProfile).....	60
Abbildung 17 Backends „Lane Availability“ und Kilometrierung.....	61
Abbildung 18 Informationsmodell für den Demonstrator „A10 - Tunnelbaustelle“ und Frontend. Markiert ist die aktuell abgebildete Informationsgruppe. ....	64
Abbildung 19 Aufbau des Backends „Lane Availability“ .....	65
Abbildung 20 Aufbau des Backends „vMax“.....	66
Abbildung 21 Grafisches Frontend für den Demonstrator A10 .....	68
Abbildung 22 Verbindungskonfiguration und Informationsmodell des Demonstrators A10 in UAExpert .....	69
Abbildung 23 Betriebsrelevante Daten zum OPC UA Server .....	70
Abbildung 24 Toolchain zur Erstellung von Informationsmodellen und dessen Implementierung in einen OPC UA Server.....	75
Abbildung 25 Rollenverteilung für den Testfeld Niedersachsen Demonstrator. Zahlen entsprechen Kapitelnummern in diesem Unterkapitel. ....	78

Abbildung 26 OPCUA Modeler: Beispieldarstellung der manuell angelegten Objekttypen .....	83
Abbildung 27 Sample Code um auf Änderungen im OPC UA Server zu subscriben. vmz_folder gibt dabei den Elternknoten im Informationsmodell an... 84	84
Abbildung 28 Visualisierung der Informationen durch das Frontend. In der Darstellung wird die Geschwindigkeit der Fahrzeuge in Fahrtrichtung Hannover dargestellt. Die Darstellung ist aus der Fahrzeugperspektive.....	86
Abbildung 29 Visualisierung der Informationen durch das Frontend. In der Darstellung wird die Geschwindigkeit der Fahrzeuge in Fahrtrichtung Hannover dargestellt. Die Darstellung ist aus der Infrastrukturperspektive. Hier wird die relevante Information durch eine schwarze Markierung dargestellt: keine Daten verfügbar. ....	86
Abbildung 30 Überblick der Betreiberstruktur des Digitalen Zwillings.....	91
Abbildung 31 Wartungs- und Problembehebungsprozesse .....	95
Abbildung 32 DIGEST Projektvideo D/E .....	99
Abbildung 33 CCAM Decision Support Platform Informationsmodell und Architektur mit OPC UA Ansatz.....	102
Abbildung 34 Kern der D-A-CH Verkehrsinfrastrukturforschungsausschreibung, Call 2020 Automatisierung .....	104

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1 Allgemeine Anforderungen an Informationsmodelle (Tabelle 2 aus der eingereichten Publikation .....	27
Tabelle 2 Beschreibung von Phänomenen und deren funktionale Aspekte .....	31
Tabelle 3 Rollen in Umsetzung und Betrieb eines Digitalen Zwillings .....	43
Tabelle 4 Rollen vs. Anforderungen .....	53
Tabelle 5 Überblick über die drei Demonstratoren auf Basis des DIGEST Konzeptes (aus Thonhofer et al. [23]) .....	55
Tabelle 6 Aufgaben autonomer Fahrzeuge beim Durchfahren einer Baustelle und deren Unterstützungsbedarf.....	57
Tabelle 7 Markante Punkte im Bereich Demonstrator A10.....	62
Tabelle 8 InfoModel Struct Felder .....	71
Tabelle 9 Zeitstempel-Format.....	73
Tabelle 10 Generische ITIL-Rollen in einem Digitalen Zwilling.....	92
Tabelle 11 Erste ITIL-Produktliste für den DIGEST Demonstrator auf der A10....	93
Tabelle 12 Interview und Workshops im Rahmen der Stakeholderanalyse in DIGEST .....	109



## KURZFASSUNG

Im Projekt **DIGEST** wurde demonstriert, wie Straßenbetreiber bei unterschiedlichen Herausforderungen im Verkehrsmanagement allgemein und beim kooperativen und automatisierten Fahren im Speziellen effektiv unterstützt werden können. Dazu wurde ein Informationsmodell auf Basis einer bereits im industriellen Kontext kommerziell eingesetzten IT-Architektur (OPC UA) erarbeitet. Die Prinzipien des Modells lassen sich auch für weitere Themenfelder, wie z.B. Asset Management erweitern. Das in **DIGEST** erarbeitete Konzept wird als **CCAM Decision Support Platform** bezeichnet.

Das in DIGEST erarbeitete **Informationsmodell** (Basis: DIKW-Modell - *Data, Information, Knowledge, Wisdom*) als eine fortgeschrittene Form von Informationsmanagement stellt einen wesentlichen Beitrag zur Abbildung eines homogenen Gesamtlagebildes des aktuellen Verkehrsgeschehens und des Straßenzustands zur produktiven Aufnahme in Abteilungen für Entscheidungen in der vernetzten kooperativen Mobilität, dem Verkehrsmanagement und auch dem Asset-Management bei Straßenbetreibern dar.

Die organisatorische Komplexität des Themas „Automatisiertes und vernetztes Fahren“ ergibt sich vor allem aus dem Umstand, dass die effiziente und effektive Einführung nicht mehr durch einzelne Unternehmen und Organisationen allein umgesetzt werden kann. Insbesondere bedarf es einer **verstärkten, kooperativen und ergänzenden Zusammenarbeit** in der Entwicklung und dem Betrieb zwischen den Automobilherstellern, Straßenbetreibern sowie der öffentlichen Verwaltung, Technologie-Anbietern und neuer Informationsdienstleister.

Diese **Kooperation** wird sich in den nächsten Jahren mit hoher Wahrscheinlichkeit **dynamisch verändern**. Verschiedene Technologien und neue Services werden im Rahmen eines Deployments voraussichtlich unterschiedliche Kostenverläufe und Vor- und Nachteile aufweisen – wenn stark steigende Fahrzeugraten und darauf aufbauende Managemententscheidungen digital unterstützt werden sollen. Somit stellt sich aus Sicht eines Straßenbetreibers vermutlich mehrfach die Frage nach „der richtigen“ Kooperationsentscheidung und „der im Technologiezyklus vorteilhaften Investitionsentscheidung“. Bei der antizipierten Wissensdynamik kann sich kein Akteur auf die Rolle eines Käufers zurückziehen; eigenes Wissen zu Konzepten, Vor- und Nachteilen und nächsten „Wendepunkten“ im Hochlauf und den damit verbundenen Kosten muss von

mehreren oder vielleicht sogar allen kompetenten Kooperationspartnern dynamisch aufgebaut und nachjustiert werden.

Im Projekt DIGEST konnte **hohes Interesse ausgewählter OEM-Stakeholder-Vertreter\*innen** an der CCAM Decision Support Platform und den Anwendungsfällen ODD-Erweiterung durch Infrastruktur-Support (vgl. ODD-Einschränkungen des Mercedes Drive Pilot), Intelligent Speed Advisory und Collective Perception identifiziert **und erste Termine mit OEM-Vertreter\*innen** durchgeführt werden. Die Rolle der D-A-CH Region und ihrer Schlüssel-Stakeholder in diesem Themenfeld konnte weiter gefestigt und konsolidiert werden.

DIGEST und die darin entwickelte **CCAM Decision Support Platform** bildet den **Überbau** der drei D-A-CH Projekte. Nachfolgendes Bild zeigt das Konzept der CCAM Decision Support Platform. **Informationen** aus den unterschiedlichen Backend-Modulen (Datenquellen wie z.B. GIP, ASFINAG Datex-II Datenstreams, Straßenoberflächenbeschaffenheitsdaten aus dem EU-Projekt [ESRIUM](#) [11], lokale Verkehrssimulationsdaten wie aus dem Projekt Symul8 [22], juristische Informationen wie Verordnungen aus dem Projekt Lex2Vehicle [20], etc.) werden in der CCAM Platform integriert und je nach notwendiger Anwendung als Quelle verschiedener Frontends (z.B. C-ITS Message Bereitstellung der Infrastrukturanbieter, Dashboards als Basis für Verkehrsmanagement-Entscheidungen oder auch interne Asset-Management Entscheidungen) verwendet. **Technische Basis ist OPC UA** (Open Platform Communications Unified Architecture). OPC UA ist ein in der Industrie bewährter Standard für den Datenaustausch als plattformunabhängige, service-orientierte Architektur (SOA). OPC UA stellt bereits alle notwendigen Basis-Mechanismen für den Daten- und Informationsaustausch zur Verfügung (Informationsmodellierung, Gültigkeitsmanagement, Rechteverwaltung, Zugangskontrollen, etc.). In der Demonstrationsphase hat sich OPC UA als geeignet erwiesen, unterschiedliche Anwendungsfälle mit diversen Informationsanforderungen, verschiedenen Datenquellen (Backends) und Datenausgabemöglichkeiten (Frontends) abzubilden.

## 1. EINLEITUNG

In Deutschland, Österreich und der Schweiz werden seit vielen Jahren Forschungsvorhaben im Bereich der Verkehrsinfrastrukturforschung beauftragt und durchgeführt. In der **D-A-CH Kooperation Verkehrsinfrastrukturforschung - 5. Ausschreibung (2020)** konnten Projekte zum Thema „Automatisierung“ in folgenden Schwerpunkten eingereicht werden: (1) Verkehrssimulation zur Anpassung von Verkehrsregeln, (2) **Digitaler Zwilling (DZ) des Verkehrssystems Straße** und (3) Digitalisierung verkehrsrechtlicher Anordnungen.

Dieser **Bericht fasst die Ergebnisse** des auf die oben genannte Ausschreibung eingereichten, genehmigten und durchgeführten Projektes **DIGEST** (Antwort auf 2-Digitaler Zwilling des Verkehrssystems Straße) zusammen. Die Projektlaufzeit von DIGEST belief sich von 01.10.2020 bis 30.9.2022.

**Projektpartner** im DIGEST Bieterkonsortium waren: FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH (Projektleiter), Vereinigung High Tech Marketing, ANDATA GmbH (mit Drittleister DLR) und ARNDT IDC GmbH & Co. KG.

Die Ziele im Projekt wurden auf Basis von fünf Arbeitspaketen erreicht und **laufend** mit der **Begleitgruppe** des Projektes (Vertreter\*innen von ASFINAG, ASTRA und BAST) **abgestimmt**. Sowohl Projektzwischen- als auch Endergebnisse wurden national und international disseminiert.

## 2. PROJEKTZIELE

Als Zielbild in DIGEST wurde am Projektbeginn ein „digitaler Zwilling“ der Straße definiert, der allen Beteiligten ein stets hochaktuelles Abbild der Situation des Verkehrssystem Straße zur Verfügung stellt. Dies wurde durch die Erarbeitung eines Konzeptes für einen Digitalen Zwilling der Straße, der Analyse der Potenziale eines solchen sowie der Spezifikation und prototypischen Umsetzung eines Demonstrators umgesetzt.

DIGEST bildet somit eine Plattform für

- „ODD Aware Traffic Management“ inkl. Spezifikation von Kriterien zur Freigabe automatisierter Fahrzeuge (statisch [Straßengeometrie, Markierung, etc.] und dynamisch per ODD-Control)
- ISAD basierte C-ITS Nachrichten zur Unterstützung von automatisierten Fahrfunktionen
- integriertes Straßen Asset Management
- die Entwicklung, die Absicherung und den sicheren Betrieb diverser kooperativer Dienste, wie etwa Collective Perception zur virtuellen Erweiterung des Sichtfelds und Informationsgewinnung über die Verkehrssituation von Fahrzeugen
- Fahrzeuginformationen als Verkehrssensor für das Verkehrsmanagement und
- kooperative Car2X-Messages.

Die Projektziele wurden in der Arbeitspaketstruktur gespiegelt und den einzelnen Tasks operationalisiert. Folgende Ziele wurden im Antrag definiert und bildeten den Rahmen des Projektes.

**Projektziel 1) Datengrundlagen für die Erstellung eines Digitalen Zwillings**

**Projektziel 2) Konzept des Digitalen Zwillings**

**Projektziel 3) Demonstrator-basierte Validierung des Konzeptdesigns**

**Projektziel 4) Betreiberkonzept für den Digitalen Zwilling**

Zusätzlich zur Zielerreichung konnte durch den Projektleiter von DIGEST die Kooperation mit den "Schwesterprojekten" dieser Ausschreibung (Lex2Vehicle [20], Symul8 [22]) gestartet und während der Projektlaufzeit aufrechterhalten werden. In zwei gemeinsamen

Workshops und zusätzlichen bilateralen Gesprächen wurden Ideen identifiziert, welche Synergien es zwischen den drei Projekten dieser DACH-Ausschreibung gibt und wie diese in Zukunft gehoben werden können. Ein gemeinsames Non-Paper wurde von Wolfgang Schildorfer (Projektleiter DIGEST) koordiniert und mit den Auftraggebern abgestimmt (siehe Kapitel 4 und die englische Übersetzung im Anhang: CCAM Decision Support Platform Non-Paper (Englisch)).

### 3. PROJEKTERGEBNISSE und TÄTIGKEITEN

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Projektergebnisse von DIGEST dargestellt. Die Abfolge der Kapitel folgt der Struktur des Arbeitsplanes und wird am Ende mit den nationalen und internationalen Disseminationsaktivitäten abgeschlossen:

Arbeitspaket 2:	3.1 Stakeholderanalyse
Arbeitspaket 3:	3.2 Konzeptentwicklung
Arbeitspaket 2/3:	3.3 Rollenmodell
Arbeitspaket 4:	3.4 Demonstratoren
Arbeitspaket 5:	3.5 Betreibermodell
Dissemination:	3.6 Dissemination




#### 3.1. Stakeholderanalyse

Für die Erstellung eines zielgerichteten Digitalen Zwillings sind einerseits die Expertise verschiedener Stakeholder, wie z.B. Fahrzeughersteller, unterschiedliche Geschäftsbereiche der Straßenbetreiber, Kartendienstleister, etc. und vielfältige Daten bei diesen Stakeholdern andererseits erforderlich. Vieles davon ist bereits vorhanden, während für andere Daten erst die entsprechenden Anforderungen festgelegt werden müssen.

Die spezifische Expertise und Erfahrungen der Projektpartner wurden dafür genutzt, die Einflussfaktoren von allen Betrachtungswinkeln - Fahrzeug, Infrastruktur, Daten, Testfelder - zu beleuchten. Auf Basis vorhandener Literatur und unterschiedlicher Forschungsprojekte zu ODD, ISAD, Datenquellen und Testfelder für CCAM (insbesondere INFRAMIX, MANTRA, EU-EIP Activity 4.2) wurde der Rahmen für ein realistisches, hochgenaues digitales Abbild der Straße geschaffen.

Dieses wurde mit Stakeholdern, zu denen im breiten Netzwerk der Projektpartner zu Straßenbetreibern, Fahrzeugherstellern, Kartendienstleistern, Verkehrsplanern, Testfeldbetreibern und weiteren Stakeholdern Kontakt besteht, in strukturierten Interviews und einem Stakeholder\*innen-Workshop validiert. So wird die Basis für die Zusammenführung vorhandener Informationen bei Straßenbetreibern, ODD und ISAD sowie HD-Karten geschaffen.

Nachfolgende Grafik zeigt die bei der Stakeholderanalyse untersuchten Bereiche, die als sogenannte Einzelentitäten in die Modellierung Eingang fanden. Dazu wurde im ersten Schritt eine Stakeholderanalyse aus Sicht der Verkehrsteilnehmer\*innen (Fahrzeuge), aus Sicht der Straßenbetreiber und hinsichtlich sonstiger Stakeholder durchgeführt. Parallel dazu wurden Entscheidungsfragen gesammelt, die sich den unterschiedlichen Stakeholdern stellen. Diese Entscheidungsfragen wurden anschließend in „Tasks“ umgewandelt und strukturiert. Als letzte Entität wurden die verfügbaren Daten untersucht. In vielen Einzelinterviews und Workshops wurde eine Sammlung an relevanten Daten inklusive Schnittstellen und weiteren Parametern zusammengestellt.

	 Relevante Stakeholder	 "Entscheidungsfragen" >> Tasks	 Daten
Was?	<ul style="list-style-type: none"> <li>Umfangreiche Sammlung von Stakeholdern im Detail bzw. im weitesten Sinne</li> <li>Gruppierung und Clustering zu relevanten Stakeholdergruppen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Als Basis für Anforderungen an einen zielgerichteten DZ werden s.g. Entscheidungsfragen gesammelt</li> <li>Entscheidungsfragen, die sich im Straßenverkehrsgeschehen stellen und einen oder mehrere Stakeholder betreffen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Welche Daten sind bei den Stakeholdern verfügbar</li> <li>In welcher Qualität, Aktualität, Format sind sie vorhanden</li> <li>Welche Schnittstellen gibt es</li> <li>Was ist für einen DZ realistisch verwendbar?</li> </ul>
Wie?	Workshops und Brainstorming im Konsortium	Brainstorming, Erfahrung, Literatur, Leistungsheft Betriebsdienst	Brainstorming, Literatur, Strukturierte Interviews

**Abbildung 1 Wesentliche Entitäten für Digitale Zwillinge**

In mehreren Konsortiums-internen Workshops wurden aufbauend auf Literatur und Erfahrung der Projektpartner die vorhandenen Daten sowie betroffene Stakeholder und deren Tasks gesammelt und als Entitäten modelliert. Mit Expert\*innen auf Seiten der Straßenbetreiber im D-A-CH Raum wurden qualitative Interviews geführt und so zusätzliche Datenquellen und Tasks identifiziert. Um das Know-how aus Testregionen einfließen zu lassen wurde in Workshops mit Vertreter\*innen des Testfelds Niedersachsen und des [Alp.Labs](#) [14] Datenstrukturen und Use Cases diskutiert. Um die Wechselwirkung von ODD, ISAD und einem digitalen Zwilling greifbar zu machen, wurde der aktuelle Stand, der sich laufend weiterentwickelnden Konzepte zu ODD und ISAD aufbereitet und in einer Expert\*innenrunde diskutiert. Die so entstandenen Stakeholder, Daten und Task Modelle wurden in einem Workshop/Projektmeeting am 07.05.2021 den Auftraggebern präsentiert und anschließend gemeinsam diskutiert.

## Relevante Stakeholder

In einer umfassenden Analyse der relevanten, betroffenen und begünstigten Stakeholder im Zusammenhang mit einem digitalen Zwilling des Verkehrssystems Straße wurden mithilfe von Fragebögen Daten gesammelt und strukturiert. Die Stakeholder wurden in 3 Kategorien – Infrastrukturbezogene Stakeholder, Verkehrsteilnehmerbezogene Stakeholder und Sonstige Stakeholder - strukturiert und modelliert. In nachfolgenden Grafiken sind diese 3 Kontextmodelle der Stakeholder dargestellt.

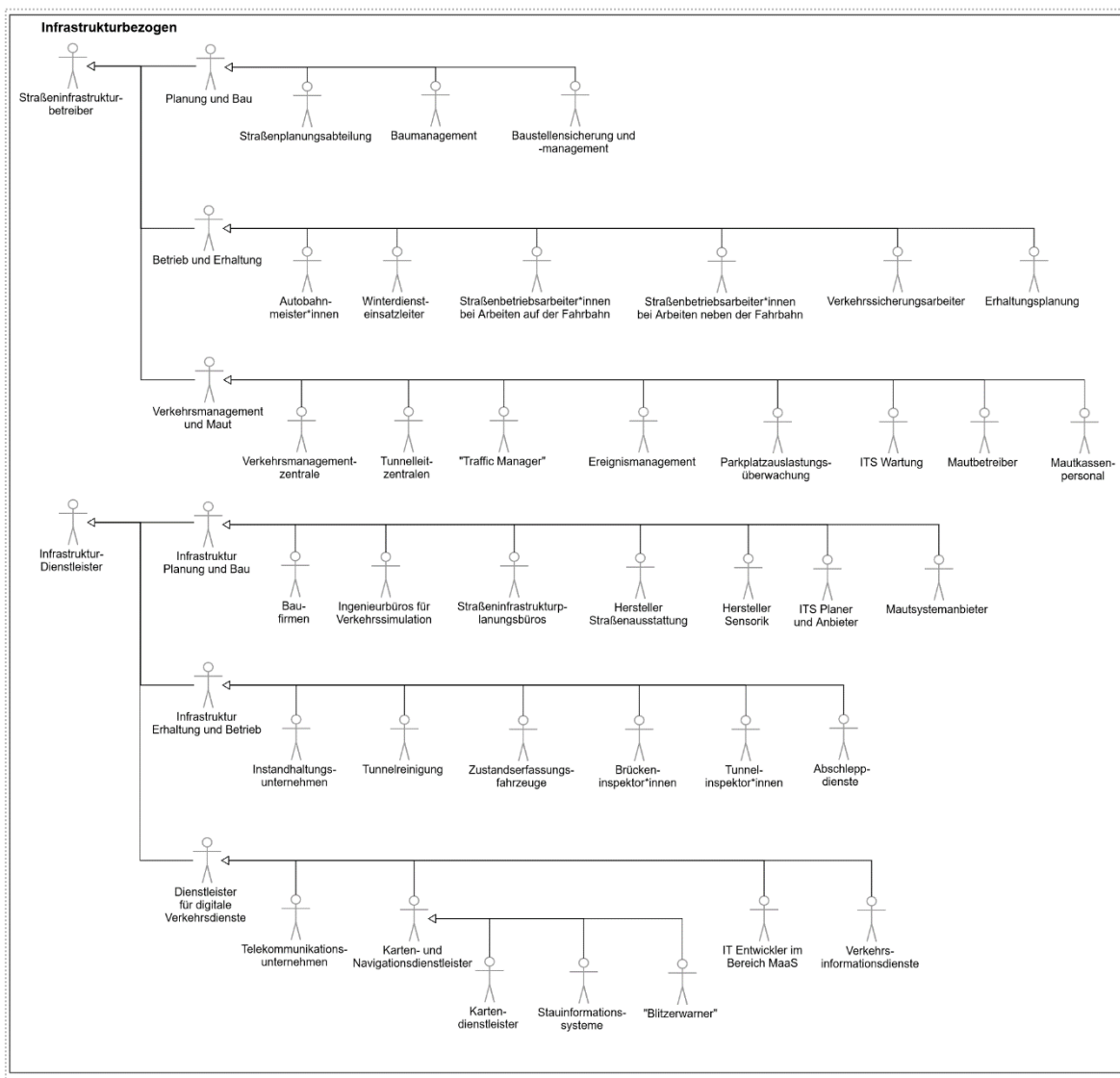


Abbildung 2 Kontextmodell Infrastrukturbezogene Stakeholder



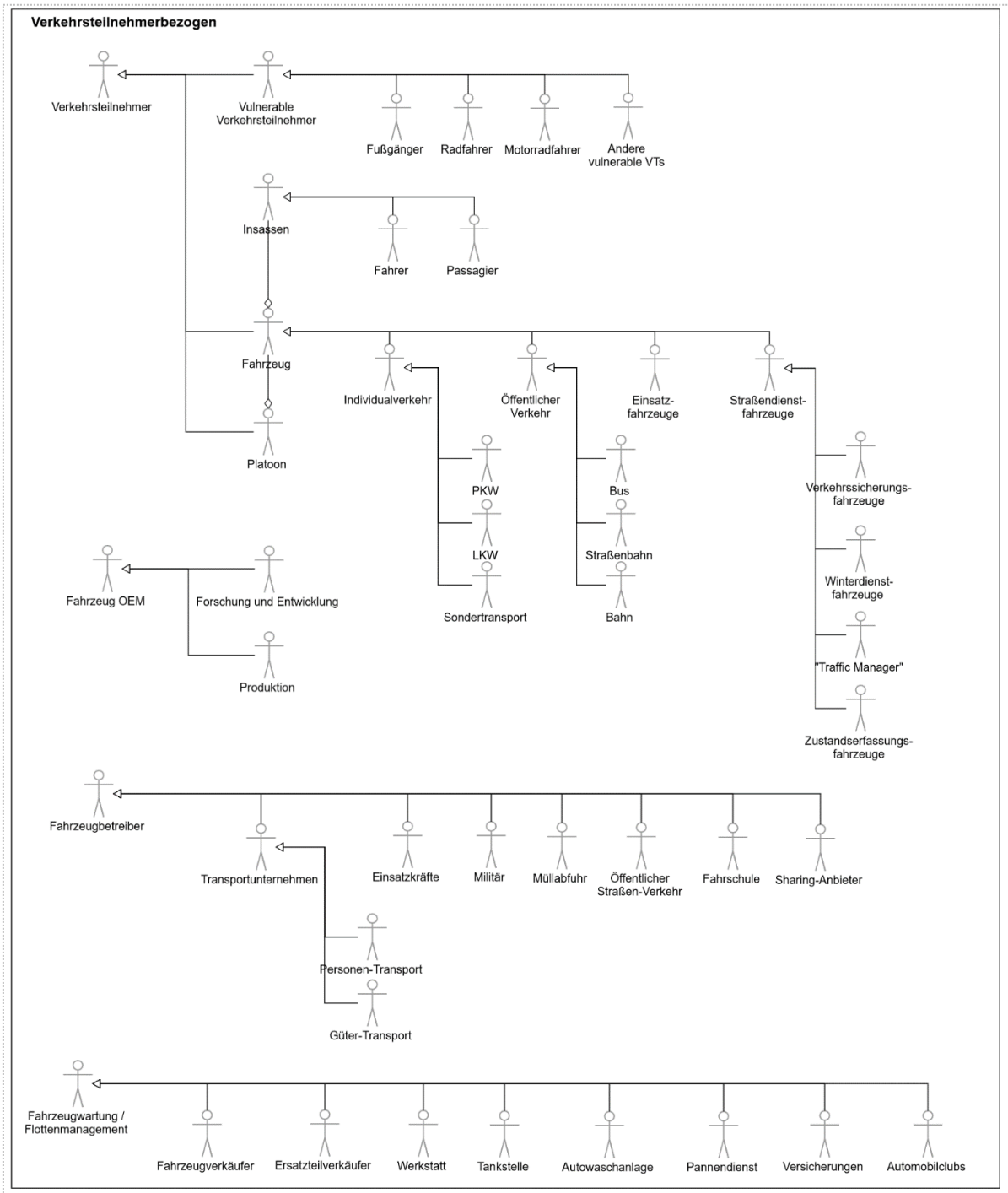


Abbildung 3 Kontextmodell Verkehrsteilnehmerbezogene Stakeholder

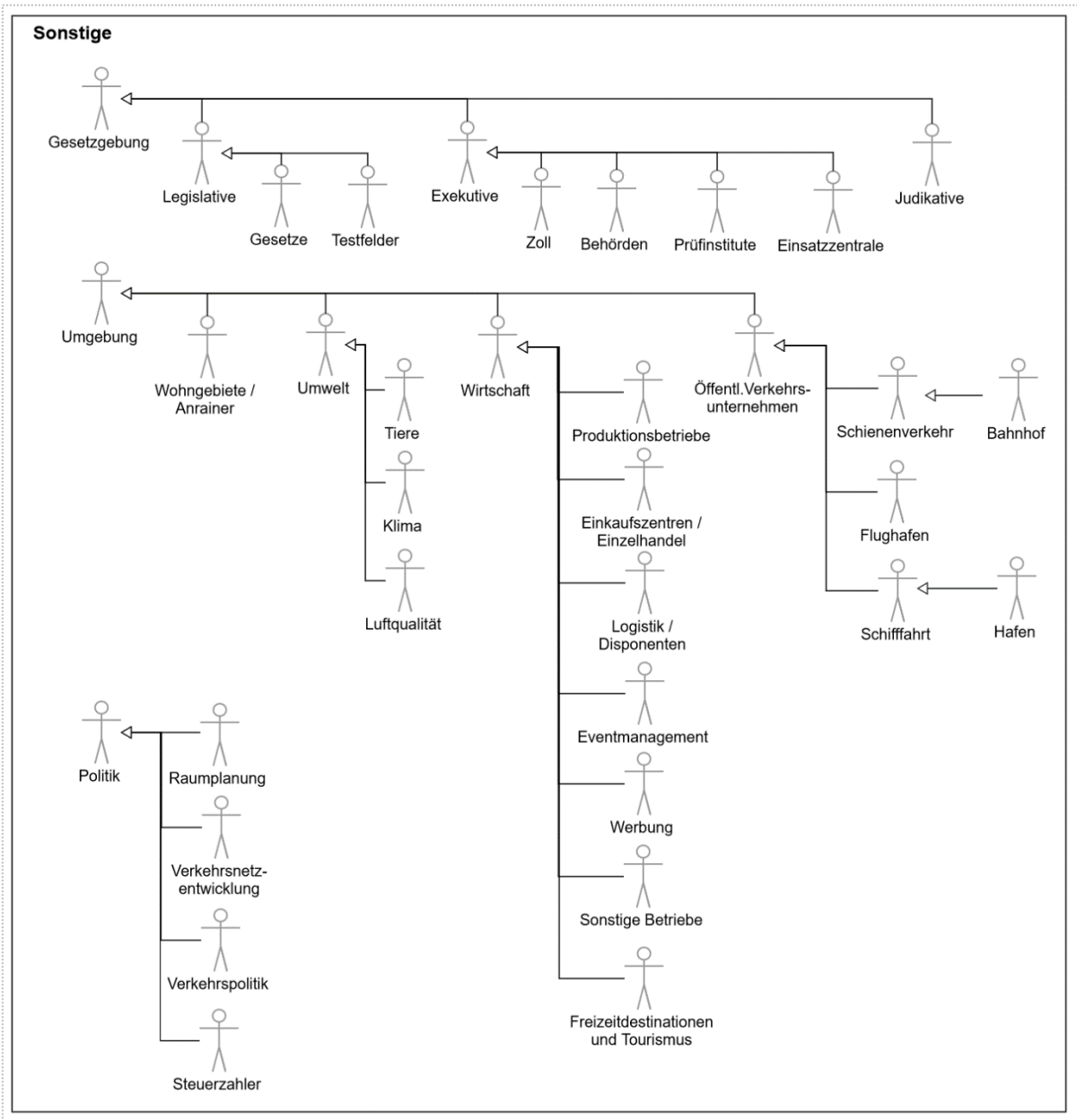


Abbildung 4 Kontextmodell Sonstige Stakeholder

### Verfügbare Daten

In qualitativen Interviews mit Expert\*innen bei Straßenbetreibern und dem Knowhow des Konsortiums wurden aktuell verfügbare Daten gesammelt und tabellarisch zusammengefasst. Anhand von definierten Prozessen, einer klaren Festlegung von tatsächlich erforderlichen Daten sowie Datenverfügbarkeitslevels sollten diese vielfältigen Daten der Straßenbetreiber, der Fahrzeuge und sonstiger Stakeholder für einen Digitalen Zwilling nutzbar gemacht werden. Zumindest sofern dies sinnvoll möglich und praktikabel

ist. Es hat sich auch hier gezeigt, dass nicht alle verfügbaren Daten mit vertretbarem Aufwand verwendbar gemacht werden können bzw. es für manche Daten einfach (noch) keinen Anwendungsfall im Sinne eines digitalen Zwillings gibt. Die Ergebnisse flossen direkt in das Informationsmodell für den DZ ein.

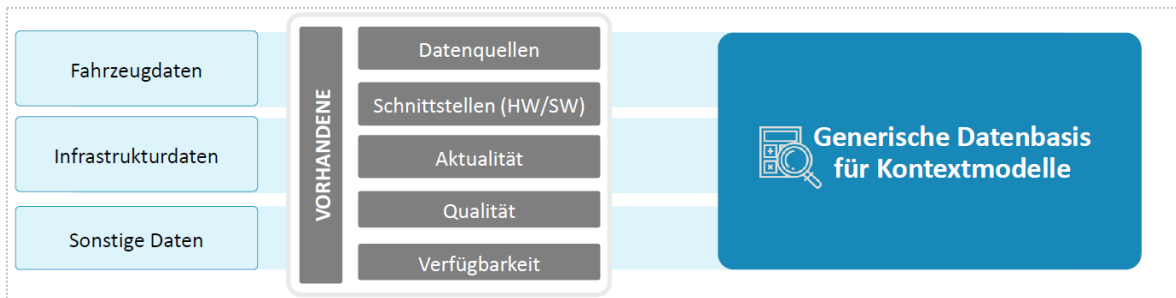


Abbildung 5 Generische Datenbasis für Kontextmodelle

### Anforderungsmanagement und Modellierungsansatz

Zur Aufarbeitung und Analyse des Themas digitaler Zwillings im Bereich Verkehrsnetz Straße wurden Modelle erstellt, die die beteiligten Entitäten und Zusammenhänge darstellen. Unterschieden werden dabei die folgenden Modellarten:

1. Verkehrliche **Kontextmodelle** (global bzw. allgemein gültig)
2. **Funktionsmodelle** für konkrete digitale Zwillings-Ideen

**Kontextmodelle** stellen jeweils nur Entitäten gleichen Typs, aus einem der Teilbereiche, sowie deren Beziehungen zueinander dar.

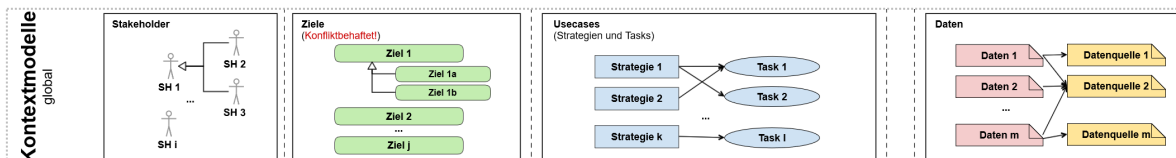


Abbildung 6 Kontextmodelle

Folgende globale, verkehrliche Kontextmodelle sind dafür erforderlich:

- **Stakeholder-Übersichten:**  
Die in der Stakeholderanalyse gesammelte und strukturierte Liste von Personen

und Einrichtungen, die das Verkehrsnetz Straße gestalten, nutzen oder davon beeinflusst werden

- **Zielmodelle:**

Beschreibung von Zielen (inklusive deren Konflikte), die von den Stakeholdern verfolgt werden

- **UseCase- / Taskmodelle:**

Beschreibung der Tätigkeiten die für eine bestimmte Zielerreichung notwendig bzw. möglich sind

- **Daten- und Datenquellen:**

Strukturiertes Datenmodell mit allen relevanten Datenarten

Das **Funktionsmodell** ist eine rein funktionale Sicht auf eine digitale Zwillings-Idee, bestehend aus Teilen der Stakeholder-, Ziele-, Task- und Datenmodelle (aus den jeweiligen globalen Kontextmodellen). Es zeigt, wem eine digitale Zwillings-Idee für bestimmte Ziele nutzen kann, wofür sie verwendet werden kann, und welche Daten dafür notwendig sind oder nützlich sein können. Der Fokus des Funktionsmodells liegt auf konkreten, auf eine digitalen Zwillings-Idee bezogene Zusammenhänge. Es hat den Anspruch auf Allgemeingültigkeit und ist lösungsfrei.

Für die Funktionsmodelle werden für konkrete digitale Zwillings-Ideen die betroffenen Stakeholder mit ihren Zielen und dafür möglichen Strategien in Relation gesetzt. Weiters werden die für die Strategien notwendigen bzw. möglichen Tätigkeiten (Tasks) dargestellt und miteinander in Beziehung gestellt. Die Tätigkeiten werden jeweils bis zur untersten Ebene dargestellt, die Daten des konkreten digitalen Zwillings benötigt. Diese Daten sind wiederum Taskabhängig und können sich hinsichtlich Art, Aktualität, Genauigkeit, Sicherheit, etc. unterscheiden. Die Anforderungen an den digitalen Zwillings sind somit abhängig von den gewählten / notwendigen Tasks, die im Funktionsmodell für ein bestimmtes Ausführungsszenario relevant sind.

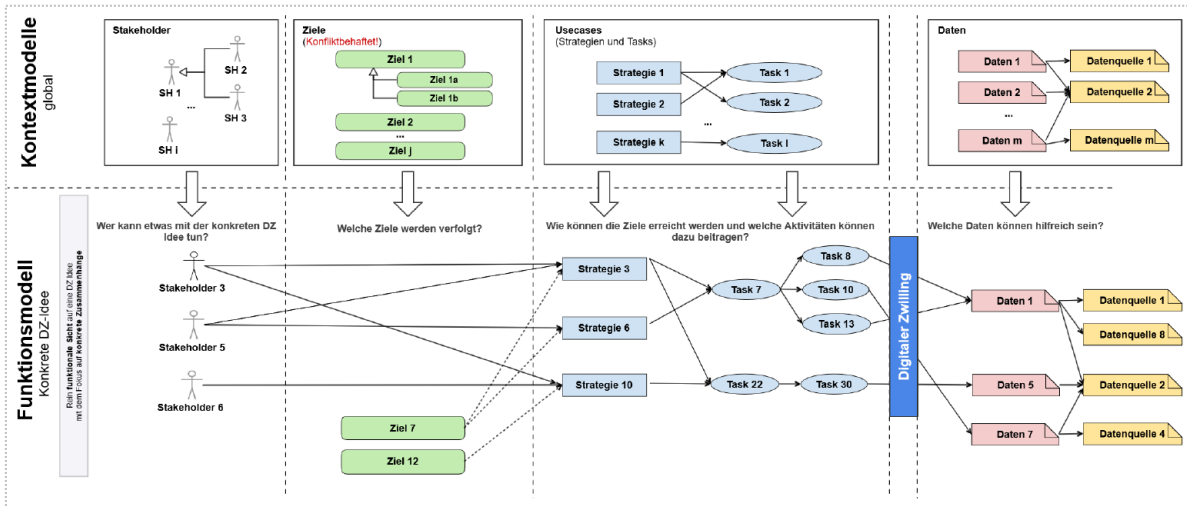


Abbildung 7 Funktionsmodelle und die Einbettung eines Digitalen Zwillings

**Ausführungsszenarios** stellen mögliche Stränge (von Akteur bis Daten) durch das Funktionsmodell dar (nicht alle Strategien oder Tasks des Funktionsmodells sind für ein Anwendungsszenario notwendig). Erst auf dieser Basis kann beurteilt werden, welche Tasks umgesetzt werden, welche Daten man dafür benötigt und wie diese beschaffen sein müssen → Anforderungen hinsichtlich Daten können also erst hier abgeleitet werden. Diese wurden in der Konzepterstellung in DIGEST erarbeitet. Nachfolgend wird ein Beispiel eines derartigen Ausführungsszenarios dargestellt.

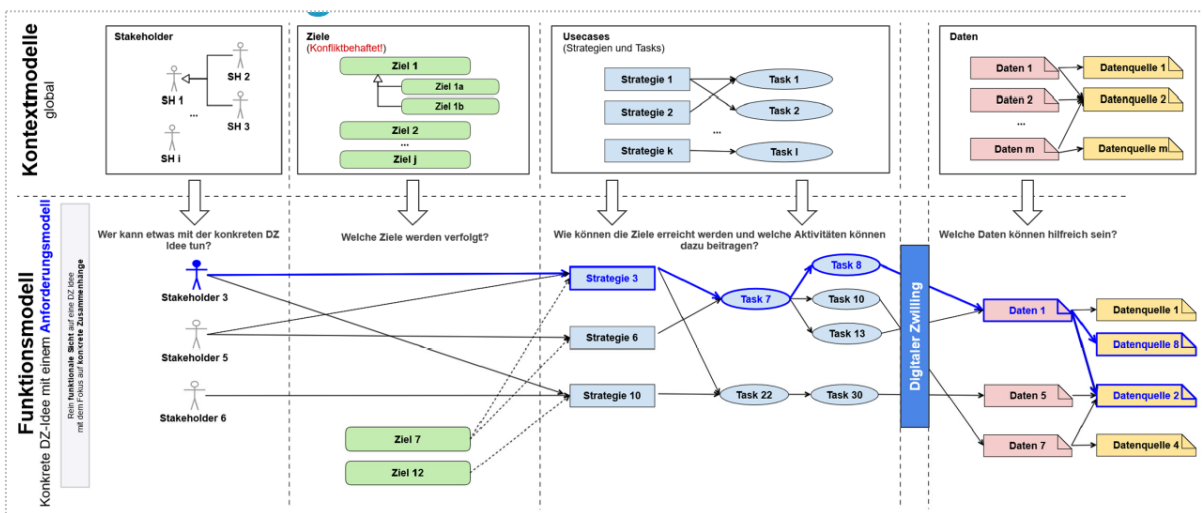


Abbildung 8 Beispielhaftes Ausführungsszenario und abgeleitetes Anforderungsmodell

Die geführten Workshops und Interviews der Stakeholderanalyse sind im Anhang „Interviews und Workshops im Rahmen der Stakeholderanalyse in DIGEST“ aufgelistet

Im Rahmen der Arbeiten zur Stakeholderanalyse wurde vom Projektpartner ANDATA folgendes Paper verfasst: „Requirements on Information Models for Smart Road Services“. Das Manuskript wurde zweimal zur Publikation eingereicht, allerdings trotz der erkannten Relevanz abgelehnt, mit der Begründung, dass es zu theoretisch gehalten ist. Die Autoren haben daher das Konzept angepasst und eine inhaltlich erweiterte Publikation angestoßen, die einen ausführlichen Umsetzungs- und Demonstrations-Teil beinhaltet. Der Titel dieser Publikation ist: „Infrastructure-based digital twins for cooperative, connected, automated driving and smart road services“. Die Publikation ist derzeit im Begutachtungslauf nach der ersten Überarbeitung des Fachjournals IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems. Das derzeit unveröffentlichte Manuskript ist in diesem Dokument zitiert als (Thonhofer et al., 2023) und als Quelle Thonhofer, Elvira, Simon Sigl, Martin Fischer, Fin Malte Heuer, Andreas Kuhn, Jacqueline Erhart, Manfred Harrer, and Wolfgang Schildorfer. "Infrastructure-based digital twins for cooperative, connected, automated driving and smart road services.", submitted for review in IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems angeführt. Weiters liegt das unveröffentlichte Manuskript als Anhang bei: UNPUBLISHED: IEEE-Paper „Infrastructure-based digital twins for cooperative, connected, automated driving and smart road services“

## 3.2. Konzeptentwicklung

Im Rahmen der Konzeptentwicklung wurde ein geeignetes Architekturkonzept für Digitale Zwillinge erstellt, dokumentiert und von den Auftraggebern abgenommen. Nachfolgend werden die Ergebnisse dargestellt.

### 3.2.1. Anforderungsanalyse

Die identifizierten Stakeholder(gruppen) bilden die Grundlage für die folgende Anforderungsanalyse. Da sowohl die Stakeholdergruppen als auch die zugehörigen Ziele, Strategien und damit verbundenem Informationsbedarf sehr unterschiedlich sind, wurde früh die Notwendigkeit der Beschränkung auf das Wesentliche erkannt. Der im Antrag lose formulierte, anwendungsorientierte Nutzen des Digitalen Zwillings wurde im Projektverlauf gemeinsam mit den Auftraggebern wie folgt konkretisiert: *„Der Digitale Zwilling soll automatisierte Fahrzeuge beim Durchfahren einer Autobahn-Tunnelbaustelle bestmöglich unterstützen.“* Die inhaltliche Festlegung erlaubt die Erarbeitung allgemeiner Anforderungen sowohl an den Inhalt des Digitalen Zwillings als auch an die technische Umsetzung eines Digitalen Zwillings.

Die Aufgaben, die Nutzer\*innen mit Hilfe eines Digitalen Zwillings erfüllen sollen, definieren, welche Inhalte dieser enthalten muss: jene, die notwendig sind, um alle Aufgaben erfüllen zu können bzw. genauer jene Informationen, die notwendig sind, um die in den Aufgaben enthaltenen Entscheidungen treffen zu können. Zunächst wurde daher analysiert, welche Aufgaben ein\*e Fahrzeuglenker\*in grundsätzlich beim Befahren von Autobahnen, beim Durchfahren von Tunnels und beim Befahren von Baustellen zu erfüllen hat. Darunter sind jene von besonderem Interesse, die erwartungsgemäß komplex sind und daher einen größeren Unterstützungsbedarf aufweisen, und deren unzulängliche Erfüllung schwerwiegende Folgen hätte (Gefährlichkeit, Verkehrsbehinderung).

Automatisierte Fahrzeuge wie Fahrer\*innen beziehen die notwendigen Informationen aus „on-board“ Sensoren (Sinnesorganen) oder bekommen diese elektronisch, durch Kommunikation mit anderen Fahrzeugen oder der Infrastruktur zur Verfügung gestellt (C2C oder C2I). Es kann nun passieren, dass die on-board Sensorik nicht ausreicht (z.B. nicht ausreichend gute Lichtverhältnisse, nicht ausreichend gute Sicht, etc.) um bestimmte Informationen selbst zu erfassen. Ist das der Fall, kann ein Digitaler Zwilling die notwendige

Information zur Verfügung stellen und erweitert damit die Operational Design Domain (ODD) des Fahrzeuges.

### 3.2.2. Information als Inhalt des Digitalen Zwillings

Grundlage der Informationsmodellierung ist zunächst die Zuordnung von Bestandteilen eines DZ zur Wissenspyramide in Abbildung 9. Die Wissenspyramide stellt verschiedene Aggregations- bzw. Abstraktionsstufen von Wissen allgemein dar.



Abbildung 9 Wissenspyramide, angelehnt an [1] Ackoff, 1989

Um Anforderungen an die Inhalte eines Digitalen Zwillings zu formulieren, muss zunächst geklärt werden, auf welcher Abstraktionsebene diese Inhalte verfügbar sein sollen. In Anlehnung an die Wissenspyramide sind mehrere Abstraktionsniveaus unterscheidbar. Hier wird die Argumentation für die zentrale Rolle des Informations-Niveaus zusammengefasst. Am folgenden Gedankenexperiment einer Geschwindigkeitsbegrenzung (hier auf 100 km/h) lassen sich die unterschiedlichen Abstraktionsniveaus gut herausarbeiten.

Die Darstellung von Inhalten auf der Zeichenebene würde bedeuten, dass alle Merkmale und Eigenschaften des Verkehrszeichens übertragen werden. Jede\*r Teilnehmer\*in muss diese empfangenen Merkmale kombinieren und das jeweilige Verkehrszeichen klassifizieren. Dieser Prozess ist nicht robust: Verdeckungen, unvollständige Merkmalsätze



oder widersprüchliche Merkmale stellen Probleme dar. Außerdem können gleichwertige Verkehrszeichen in verschiedenen Ländern unterschiedlich aussehen.

Die Darstellung von Inhalten auf der Datenebene würde bedeuten, dass die Position und der Typ des Verkehrszeichens übertragen werden. Dies erscheint vertraut, da es die etablierte Art der Kommunikation zwischen der Straßenverkehrsbehörde und dem menschlichen Fahrer nachahmt. Außerdem verringert es die Robustheitsprobleme und ist im Vergleich zur Signalebene weniger umfangreich. Für die Ableitung der Geschwindigkeitsbegrenzung sind jedoch zusätzliche Daten erforderlich, z. B. ein weiteres (späteres) Verkehrsschild, das das Ende der Geschwindigkeitsbegrenzung anzeigt oder die Kenntnis der auf dieser Straße gültigen allgemeinen Geschwindigkeitsbegrenzung.

Die Darstellung von Inhalten auf der Informationsebene würde bedeuten, dass eine vollständige Beschreibung der Geschwindigkeitsbegrenzung übermittelt wird, einschließlich der offensichtlichen Höchstgeschwindigkeit, aber auch des geografischen, situativen und zeitlichen Geltungsbereichs sowie der angesprochenen Fahrzeugtypen. Dies lässt wenig Spielraum für Interpretationen aufgrund von Rückschlüssen/Klassifizierungsfehlern oder Fehlern, die durch unvollständige Daten oder Signale verursacht werden, wie z.B. das Fehlen des entsprechenden Aufhebungszeichens.

Die Darstellung von Inhalten auf der Wissensebene würde bedeuten, dass eine Nachricht wie "Ihre Geschwindigkeit sollte 100 km/h nicht überschreiten", oder „weil Sie einen bestimmten Anhänger ziehen, sollte Ihre Geschwindigkeit 80 km/h nicht überschreiten" übermittelt wird. Dies setzt voraus, dass der Absender etwas über den Empfänger weiß. In diesem Beispiel erfordert die Kommunikation auf der Wissensebene, dass der Absender Zugang zu zusätzlichen Merkmalen des Empfängers hat wie Fahrzeugtyp, Führerscheintyp, Vignette, Achslast usw., mit Nachteilen im technischen und rechtlichen Bereich. In diesem Arbeitsbeispiel ist die Umwandlung von Informationen in Wissen äquivalent zu dem mentalen Schritt, den ein menschlicher Autofahrer unternimmt, wenn er ein Schild mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung an einem Ort (Information) erkennt und zu dem Schluss kommt, dass „dieses bestimmte Schild für mich gilt“.

Die Präsentation von Inhalten auf der Handlungsebene würde die Übermittlung von Empfehlungen beinhalten, wie z. B. „Sie sollten langsamer fahren“, oder sogar (Fern-)

Befehle, die bis zu einem Eingriff in das Bremssystem des Fahrzeugs reichen. Dies bedeutet im Wesentlichen, dass der Sender Aufgaben übernehmen würde, die traditionell vom Fahrer (oder einer automatisierten Fahrfunktion) ausgeführt werden. Abgesehen von rechtlichen Fragen ist es zweifelhaft, dass eine angemessene Berücksichtigung des gesamten situativen Kontexts durch andere Instanzen als den Fahrer gewährleistet werden kann.

Die obige Diskussion zeigt, dass die **Darstellung von Inhalten auf der Informationsebene am vorteilhaftesten** ist. Dieser Ansatz gewährleistet die Durchführbarkeit und Aufwärtskompatibilität in Bezug auf (künftige) Sensorsysteme und vermeidet rechtliche Fragen hinsichtlich der Verantwortung des Fahrers oder der AD-Funktion. Die Verantwortung für die korrekte Ableitung von Wissen aus Informationen und dem situativen Kontext verbleibt beim Fahrer, einer AD-Funktion oder generell beim Empfänger. Gleichzeitig wird nicht einfach die etablierte Art der Kommunikation (über Verkehrszeichen) nachgebildet, die für eine internationale Anwendbarkeit nur schwer zu standardisieren ist und hinsichtlich der Vollständigkeit und Richtigkeit der übermittelten Informationen fehleranfällig ist.

Die Nutzung der Information beinhaltet in der Regel das Treffen von Entscheidungen. Aus dieser Überlegung leitet sich die Bezeichnung **“CCAM DSP”** ab, was “Cooperative, Connected and Automated Mobility Decision Support Platform” bedeutet. Die Bezeichnung ist im Zusammenhang dieses Dokuments synonym zu „Digitaler Zwilling“ (DZ) zu verstehen.

### 3.2.3. Informationsmodellierung

Ein Informationsmodell für intelligente Straßendienste deklariert und strukturiert alle denkbaren relevanten Informationen. Der Begriff des Informationsmodells wird in der Literatur manchmal auch als Datenmodell oder Ontologie bezeichnet. Um Informationen quellen- und empfängerübergreifend sinnvoll nutzen zu können, ist eine einheitliche Formulierung der Information essenziell.

Derzeit gibt es kein allgemein anerkanntes Informationsmodell, das alle denkbaren Aspekte intelligenter Straßendienste abdeckt. Dies verdeutlicht den Standardisierungsbedarf, der adressiert werden muss, bevor Fahrzeuge untereinander und mit der Infrastruktur sinnvoll

Informationen austauschen können. Als Grundlage für die Entwicklung von Informationsmodellen und später auch Standardisierungsarbeiten wurden allgemeine Anforderungen an Informationsmodelle identifiziert, siehe Tabelle 1 (Auszug aus der eingereichten Publikation).

**Tabelle 1 Allgemeine Anforderungen an Informationsmodelle (Tabelle 2 aus der eingereichten Publikation)**

ID	Requirement	Description
I01	Source agnostic	Information is presented in a technology neutral way.
I02	Receiver agnostic	Information is valid independent of the receiver.
I03	Self-contained	A piece of information should be complete and atomic.
I04	Unambiguous	Meaning must not be subject to interpretation.
I05	Context-free	Meaning does not depend on the context.
I06	Universal	The diversity of worldwide road traffic shall be expressible.

Insbesondere die Anforderungen I01 und I02 sind von zentraler Bedeutung für die Nutzbarkeit von Digitalen Zwillingen. Anforderung I01 stellt sicher, dass die Inhalte des Digitalen Zwillings aufwärtskompatibel mit (aktuellen und) zukünftigen Sensoren, Messprinzipien und Sensorfusionsalgorithmen sind. Anforderung I02 stellt sicher, dass Inhalte im Digitalen Zwillings für alle aktuellen und zukünftigen Empfänger nutzbar sind. Es sind auch die beiden Anforderungen I01 und I02, die nur erfüllt werden können, wenn die Inhalte des Digitalen Zwillings auf der Abstraktionsebene der Information aufliegen. Die Anforderungen I03-I05 befassen sich mit der Darstellung von Inhalten. Die letzte Anforderung I06 behandelt die Allgemeinheit als Voraussetzung für die weltweite Anwendbarkeit.

I01: Die Anforderung, dass der Inhalt quellenagnostisch sein muss, gewährleistet die Anwendbarkeit jeder denkbaren Wahrnehmungsmethode. Ist diese Forderung erfüllt, können Informationen nicht nur von heute verfügbarer Technik, sondern auch von zukünftigen Sensoren, die auf neuartigen Sensortechnologien basieren, bereitgestellt werden. Dies bedeutet, dass die Wahrnehmungstechnologie im Hintergrund geändert und aktualisiert werden kann, ohne dass Änderungen am Informationsmodell oder auf der Empfängerseite erforderlich sind.

I02: Empfängerunabhängig zu sein bedeutet, dass der Inhalt so gestaltet ist, dass er keine Einschränkungen hinsichtlich des Empfängers, der die Informationen nutzen kann, mit sich bringt. Es bedeutet auch, dass der Inhalt nicht speziell auf einen bestimmten Empfänger zugeschnitten ist. In unserem Arbeitsbeispiel erhalten alle Verkehrsteilnehmer\*innen die Information, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt und in einem bestimmten räumlichen Bereich ein Tempolimit besteht, vgl. Gedankenexperiment aus Abschnitt 3.2.2. Jede\*r Verkehrsteilnehmer\*innen muss jedoch selbst feststellen, ob diese Geschwindigkeitsbegrenzung für sie/ihn gilt (d.h. er muss aus der Information spezifisches Wissen ableiten).

I03: Eine in sich geschlossene Information unterstützt nicht nur die Konsistenz, sondern erhöht auch die Robustheit gegenüber bestimmten Fehlern oder Missverständnissen. So ist es beispielsweise wünschenswert, dass der zeitliche und räumliche Geltungsbereich einer Regel und die Regel selbst in einer atomaren Informationseinheit ausgedrückt werden. Im Arbeitsbeispiel sind das Tempolimit, sein Wert sowie sein räumlicher und zeitlicher Geltungsbereich in einer Informationseinheit enthalten. Beachten Sie, dass Verkehrsschilder gegen diese Anforderung verstoßen. Beginn und Ende einer Geschwindigkeitsbegrenzung werden traditionell durch zwei einzelne Verkehrszeichen kommuniziert. Wenn ein Autofahrer das Ende -Schild übersieht, verlässt er sich oft auf den Kontext und schließt aus der Beobachtung des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer auf die Tatsache. Je nach persönlichem Ermessen und Risikoeinschätzung kann er die Geschwindigkeit anpassen oder nicht. ihre Fahrweise entsprechend anzupassen.

I04: Eine eindeutige Information ist schwer misszuverstehen. Verkehrsgesetze und -vorschriften sind speziell auf Eindeutigkeit ausgelegt und erreichen dieses Ziel in zufriedenstellendem Maße, z. B. können Verkehrszeichen von Menschen leicht unterschieden werden.

I05: Die bestehenden Gesetze und Vorschriften sind jedoch nicht kontextfrei. Der Fahrer benötigt zusätzliche implizite Informationen, um seine Fahraufgaben korrekt auszuführen. In den meisten Ländern herrscht beispielsweise Rechtsverkehr, in einigen Linksverkehr. Beim Überqueren der Grenze zwischen Frankreich und dem Vereinigten Königreich muss der Fahrer auf Linksverkehr umschalten und außerdem im Uhrzeigersinn durch Kreisverkehre fahren, andere Fahrzeuge rechts überholen usw. Kontextabhängige Inhalte

sind anfällig für Fehlinterpretationen durch Maschinen. Daher sollten die Informationen kontextfrei sein und einer Chomsky -Typ - 2 - Grammatik [6] entsprechen.

I06: Schließlich ist die Universalität eine notwendige Bedingung für die internationale Anwendbarkeit. Diese Anforderung ist leicht formuliert, aber ihre Erfüllung ist mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Einerseits erfordert sie, dass Gesetze und Vorschriften sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene in sich konsistent sind. Andererseits erfordert sie eine international standardisierte oder zumindest mindestens kompatible Sprache, um sie auszudrücken. Ein Teil dieses Spektrums ist bereits durch ETSI genormt, wo Informationen definiert, die viele, wenn nicht alle der oben genannten Anforderungen erfüllen.

#### 3.2.4. Ungelöste Probleme und Kritik an bestehenden Ansätzen

Es konnte im Rahmen der konkreten Informationsmodellierung für den Demonstrator A10 (Kapitel 3.4) die Kritik an bestehenden, bereits standardisierten Informationen konkret formuliert und argumentiert werden. Außerdem sind ungelöste, wiederkehrende und absehbar relevante Problemstellen identifiziert. Diese sind aus Projektsicht mit hoher Priorität in (internationalen) Standardisierungsgremien zu adressieren.

##### *Fehlende Standardisierung in der Parametrierung von Vorschriften*

Für das Projekt direkt relevant ist die Beschreibung von Gültigkeitsbereichen (scopes) von Regeln bzw. Vorschriften. Diese müssen ausdrücken können wo (räumlich), wann (zeitlich), für wen (subjekt-bezogen) und in welchen Situationen (situativ) eine Regel gilt.

Die räumliche Gültigkeit kann im Idealfall drei charakteristische Beschreibungen abbilden:

- Punktuelle Gültigkeit (z.B. Stopp-Gebot)
- Lineare Gültigkeiten (z.B. Vorrangstraßen)
- Flächige Gültigkeiten (z.B. maximal erlaubte Höchstgeschwindigkeit im Ortsgebiet)

Die zeitliche Parametrierung muss international in zumindest folgenden Aspekten homogenisiert werden:

- Definition von Feiertagen, Wochentagen, Wochenenden.
- Definition von Ferienzeiten
- Wochenbeginn (Sonntag oder Montag)
- Periodische Gültigkeiten

Die subjektbezogenen (z.B. Fahrzeugklassen) und situativen Aspekte der Gültigkeit (z.B. „bei Nässe“) sind schwer zu definieren. Besonders hier fehlen international standardisierte Parametrierungsansätze.

### *Kritik an bestehenden C-ITS Nachrichten*

Informationen können sich an Menschen oder Maschinen richten. Dabei ist zu unterscheiden, welcher Informationsinhalt übertragen werden muss.

1. **Informationen für Menschen** können auf Ebene der Phänomene übertragen werden. Die Implikationen eines Phänomens (hinsichtlich funktionaler Aspekte) können durch Menschen einfach und in vorhersehbarer Weise verstanden werden.
2. **Informationen für Maschinen** sollten Phänomen-agnostisch sein und stattdessen die implizierten funktionalen Aspekte ausdrücken. Phänomene – wie z.B. die Liste von "harten Hindernissen" (Baum, Betonwand, anderes Fahrzeug, verlorene Waschmaschine, ...) wird nie vollständig erfasst sein. Aus funktionaler Sicht ist dies auch nicht relevant. Hingegen relevante funktionale Aspekte sind, ob eine Fläche befahren werden kann und darf. Der Mensch kann auch mit den funktionalen Aspekten umgehen, würde also diese "Ausdrucksweise" auch verstehen.

Die folgende Tabelle 2 fasst einige relevante Phänomene zusammen, für die aktuell C-ITS Messages existieren oder im Entwurf sind. Deren funktionale Aspekte sind parallel gelistet und wären aus unserer Sicht deutlich effizienter und allgemeingültiger zu kommunizieren. Darüber hinaus sind die Phänomene eine immer unvollständige Liste, aus der jeder Eintrag sensorisch eindeutig bestimmbar sein muss, um die passende Nachricht zu generieren.

**Tabelle 2 Beschreibung von Phänomenen und deren funktionale Aspekte**

Phänomen	Aspekte des Phänomens (nicht relevant für die Maschine)	Implizierte funktionale Aspekte	Kommentar
Bodenmarkierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Position</li> <li>• Länge, Breite</li> <li>• Farbe</li> <li>• Reflektivität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Spurverlauf</li> </ul>	<p>"Wenn das Fahrzeug C-ITS kann, brauche ich nicht zu kommunizieren, dass die Bodenmarkierungen hier orange sind, sondern kann auf diesem Weg direkt sagen, wie der Fahrstreifenverlauf ist."</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• die orange Bodenmarkierung beschreibt einen (geänderten) Fahrstreifenverlauf (der normale Verlauf wäre weiss markiert)</li> <li>• die Kommunikation der Farbe hilft nur "ein bisschen" und überlässt das Finden des korrekten Fahrstreifenverlaufes nach wie vor der Maschine</li> </ul>
Leitkegel (traffic cone)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Position</li> <li>• Farbe, Muster</li> <li>• Material</li> <li>• im Boden verankert ja/nein</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Spurverlauf (mit reduzierter Positionsgenauigkeit wegen)</li> <li>• Überfahrbar (z.B. im Notfall)</li> <li>• Geringe Masse und Steifigkeit</li> </ul>	<p>Andere Phänomene haben tw. gleiche funktionale Aspekte, zB</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fähnchen</li> <li>• Baken (rechteckige Leitflächen)</li> <li>• Beton-Mauern</li> <li>• etc.</li> </ul> <p>Jedes dieser Phänomene müsste extra beschrieben (und damit auch bedatet) werden</p>
Ladegut auf der Fahrbahn	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Position</li> <li>• ev. Dimensionen (LxBxH)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hindernis</li> <li>• Überfahrbarkeit (z.B. im Notfall)</li> <li>• Masse und Steifigkeit</li> </ul>	<p>Andere Phänomene haben tw. gleiche funktionale Aspekte, zB</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Person auf der Fahrbahn</li> <li>• Pannenfahrzeug auf der Fahrbahn</li> <li>• Stau-Ende</li> <li>• Tiere auf Fahrbahn</li> <li>• Fahrbahnschaden</li> <li>• etc.</li> </ul> <p>Für viele dieser Phänomene gibt es bereits eigene DENM.</p>
Straßentyp "Forstweg"		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unebenheit der Fahrbahn</li> <li>• Steigung (grösser als auf anderen Strassen)</li> <li>• Griffigkeit (insbes. bei Nässe)</li> <li>• Erhöhte Wahrscheinlichkeit von Hindernissen (Äste, Wild)</li> </ul>	

### *Standardisierungsbedarf für Abläufe und Protokolle*

Es gibt einen Bedarf an Standardisierung für Abläufe und Protokolle, insbesondere für Protokolle, die die Automatisierung komplexer Aufgaben ermöglichen, wie zum Beispiel die Abwicklung von Tankvorgängen, Valet Parking und Last-Mile-Support. Ein wichtiger Teil dieses Standardisierungsbedarfs umfasst die Festlegung von Namespaces für verschiedene Entitäten, wie beispielsweise Produkte und Dienstleistungen, Protokolle für die Interaktion von Fahrzeugen mit Infrastruktureinrichtungen, oder auch zur Beschreibung der Fähigkeiten von hochautomatisierten Fahrzeugen. Durch Standardisierung kann eine universelle Interpretierbarkeit und eine eindeutige Referenzierung ermöglicht werden. Es ist wichtig, dass diese Themen zumindest innerhalb des angestrebten Gültigkeitsbereiches, sei es global, EU-weit oder national, harmonisiert werden.

#### 3.2.5. Anforderungen an eine technische Realisierung

Aus der vorangegangenen Stakeholderanalyse, deren Zielen, Strategien und Aufgaben lassen sich auch für die technische Umsetzung eines Digitalen Zwillings Anforderungen ableiten. Diese sind in Abbildung 10 zusammengefasst. Die Anforderungen decken ein sehr breites Spektrum ab und stellen in ihrer Gesamtheit eine ernst zu nehmende Herausforderung dar. Einige der Anforderungen treten auch in der Industrieautomatisierung auf, wo hohe Echtzeitanforderungen erfüllt werden müssen. Andere können durch robuste, verteilte Systeme adressiert werden. Zusätzlich sind hier Interoperabilität und Sicherheit von großer Bedeutung.



Architecture			DT*	RT*
A01	Extensible	Addition of further backends and frontends shall be possible. Incremental/migratory rollout shall be possible.	x	(x)
A02	Modular and reusable	Data sources, information modules and frontends shall be reusable (in different applications).	x	
A03	Distributable	Frontends and backends can run on the same machine, but also on suitably interconnected machines.	x	x
A04	Flexibility	e.g., regarding data volume, cycle time, number of backends and frontends.	x	
A05	Hardware-neutral	There should be no fundamental restriction regarding the computing environment used. e.g., PC, industrial controller, virtual machine, cloud.	x	
Real time				
RT01	Different time scales	Event-based, as well as cyclic depending on the application (ranging from sub-second to weekly).	x	(x)
RT02	Different cycle times	Frontends and backends must be able to run asynchronous, in different cycle times or synchronized.	x	
RT03	Real-time capable	The implementation shall support establishing (end to end) real-time guarantees.	x	
Data sources				
DS01	Robustness	Failures of data sources must not affect overall system operation.		x
DS02	Processing chains	Backends shall be able to use information provided by other backends.	x	
Security				
S01	Authenticity	Information provider must be verifiable.	x	x
S02	Confidentiality	Restriction of read access must be possible.	x	x
S03	Integrity	Information must not be modified in an unauthorized or undetected manner.	x	x
IT				
IT01	Available	A defined (and potentially very high) quality of service level must be reached.	x	x
IT02	Maintainable	Capability for on-line diagnosis and modular software updates.	x	x
Functional requirements on the information model				
F01	Inter-operable	Information models shall be vendor independent and support standardization.	x	
F02	Information quality	Information quality shall be expressible (e.g., timeliness, accuracy, uncertainty).	x	
F03	Metadata	Metadata shall be expressible (e.g., units, data types, encoding, missing/invalid values).	x	

\* DT: Design Time requirement, RT: Run Time requirement

**Abbildung 10 Anforderungen für technische Umsetzung eines Digitalen Zwillinges**

Die umfangreiche Liste der Anforderungen suggeriert, dass nicht ein einzelnes System alle Anforderungen erfüllen wird können, sondern, dass eine Plattform-Architektur gefunden werden muss, die keiner der Anforderungen konzeptionell widerspricht. Abbildung 11 Architekturkonzept Digitaler Zwilling in DIGEST schlägt einen grundsätzlichen Aufbau einer geeigneten Plattform-Architektur vor. Der DZ ist darin zentral positioniert. Backend bezeichnet Algorithmen die aus (verschiedenen, möglicherweise redundanten) Datenquellen Information extrahieren. Die Verarbeitung umfasst beispielsweise Filterung, Glättung, Fusion, aber auch Prädiktion. Frontend bezeichnet Systeme, die Use Case spezifisch Information präsentieren und ggf. automatisiert, unter Einbeziehung von anwendungsspezifischem und/oder situativem Kontextwissen, Entscheidungen ableiten. Die Verarbeitung umfasst beispielsweise Visualisierung, in-Kontext-setzen, Gewichten von Informationen, Ableiten von Handlungsempfehlungen oder sogar (automatisiertes) Handeln.

### 3.2.6. Relevante Technologien

Zur technischen Realisierung der skizzierten Architektur stehen grundsätzlich mehrere Möglichkeiten zur Verfügung und wurden im Rahmen des Projektes sondiert, um eine geeignete Lösung zu identifizieren.

#### *OPC UA und OPC UA TSN*

OPC UA stammt aus der Industrieautomatisierung und ist dort schon seit mehreren Jahrzehnten erfolgreich im Einsatz. OPC versteht sich als “interoperability standard for the secure and reliable exchange of data in the industrial automation space” [13]. Darin sind Themen wie Interoperabilität, Erweiterbare Standardisierung, Security, Meta-Informationsmodellierung, Austauschbarkeit von Sprachen und Einheitensystemen, Rechte und Rollen, Redundanz-, Skalierungs- und Echtzeitanforderungen, Protokoll-Unabhängigkeit sowie unterschiedliche Datenübertragungsmodelle adressiert.

OPC UA lässt sich kompakt charakterisieren:

1. Plattformunabhängigkeit: OPC UA ist plattformunabhängig und kann sowohl auf Windows- als auch auf Linux-basierten Systemen eingesetzt werden.
2. Interoperabilität: OPC UA ermöglicht die Kommunikation zwischen verschiedenen Systemen und Anwendungen, unabhängig davon, welche Programmiersprache oder Hardware verwendet wird.
3. Sicherheit: OPC UA bietet verschiedene Sicherheitsfunktionen, darunter Verschlüsselung, Authentifizierung und Zugriffskontrolle, um eine sichere und zuverlässige Datenübertragung zu gewährleisten.
4. Skalierbarkeit: OPC UA unterstützt sowohl kleine als auch große Systeme und kann leicht skaliert werden, um den Anforderungen der Anwendung gerecht zu werden.
5. Flexibilität: OPC UA erlaubt die Definition individueller Informationsmodelle, die es ermöglichen, Daten in strukturierter Form zu übertragen.
6. Informationsmodellierung: OPC UA unterstützt state-of-the-art Konzepte wie Objekte, Vererbung, Methoden, Events, Referenzen.
7. Datenübertragung: OPC UA bietet mehrere Übertragungsoptionen vom Server zum Frontend: Verschlüsselt oder als Klartext, Subscriptions für Event-basierte Updates,

normales Read für updates on demand, Pub/Sub für zyklische Echtzeitinformationen.

Als nachteilig können folgende Aspekte gewertet werden:

1. Komplexität: OPC UA kann aufgrund seiner Vielseitigkeit komplex sein und erfordert möglicherweise umfangreiches Wissen und Schulungen, um ihn effektiv nutzen zu können.
2. Kosten: Die Implementierung von OPC UA kann mit Kosten verbunden sein, insbesondere wenn es sich um größere Systeme handelt, die möglicherweise spezialisierte Hardwareanforderungen haben.

OPC UA TSN ist eine optionale Erweiterung von OPC UA um Time Sensitive Networking (TSN) - eine standardisierte Ethernet-erweiterung für kurze Zykluszeiten bis unterhalb des Millisekundenbereichs und garantierbare Übertragungseigenschaften ist. Diese Erweiterung ist allerdings noch in Entwicklung und zum Zeitpunkt der Berichtslegung noch nicht in vielen verfügbaren Software- und Elektronikkomponenten unterstützt.

#### *Echtzeit-Hardware: Industriesteuerungen (SPS) und Feldbus-Systeme*

Gängige Baukastensysteme unterschiedlicher Automatisierungstechnik-Hersteller stehen zur Verfügung und erleichtern die hardware- und softwaremäßige Umsetzung echtzeitfähiger *Datenquellen* sowie die Anbindung von Sensoren. Auch die Anbindung gewisser *Frontends* (z.B. für die drahtlose Weitervermittlung von Informationen) kann durch solche Baukastensysteme vereinfacht werden. Echtzeitfähigkeit des gesamten DZs wäre erreichbar, wenn auch die *Informationsaufbereitung* auf einer Industriesteuerung mit Echtzeitbetriebs- und I/O System läuft. Allerdings sollte dabei auf den Einsatz von proprietären Protokollen und Technologien so weit möglich verzichtet und stattdessen auf OPC UA gesetzt werden, das in praktisch allen Industriesteuerungen und in einer zunehmenden Anzahl von Sensoren und Aktuatoren nativ unterstützt wird.

#### *Cloud-Lösungen (Infrastructure-as-a-service, als Frontend, als Backend)*

Als mögliche Option wurde GAIA-X (Europäische Cloud-Lösung) in Betracht gezogen. Das erklärte Ziel von GAIA-X ist es, ein offenes, transparentes digitales Ökosystem für

Bereitstellung, Sammlung und Teilen von Daten und Services in einem vertrauensvollen Umfeld zu sein. GAIA-X basiert auf Standards und garantiert Interoperabilität und Portierbarkeit. Es unterstützt Security und Privacy by Design. Allerdings ist es noch in Entwicklung / Prototyping ("The first GAIA-X services will be prototypically implemented by early 2021."). Daher wurde es im Rahmen des Projektes nicht weiter berücksichtigt. Wenn OPC UA auch einen hohen Vorsprung im insgesamten Reifegrad hat, kann für zukünftige Realisierungen von CCAM DSPs GAIA-X erneut evaluiert werden, da davon auszugehen ist, dass es im Lauf der nächsten Jahre intensiv weiterentwickelt wird.

### 3.2.7. Umsetzung der Architektur im Projekt

Auf der Grundlage der ermittelten Anforderungen werden in diesem Abschnitt eine Architektur und eine Lösungsstrategie vorgeschlagen, die nach Ansicht der Autor\*innen die Erfüllung aller genannten Anforderungen ermöglicht. Zentrale Fragen bei der Definition einer (Plattform-)Architektur sind die Verteilung von Aufgaben auf einzelne Komponenten sowie das Finden geeigneter Schnittstellen zwischen diesen Komponenten. Der hier vorgestellte Architekturentwurf basiert auf der DIKW-Pyramide und den Abstraktionsebenen aus Kapitel 3.2.2. Daraus ergibt sich eine einfache Darstellung des grundsätzlichen Datenflusses, die in Abbildung 11 mit beispielhaften Front- und Backend-Konfigurationen dargestellt ist.

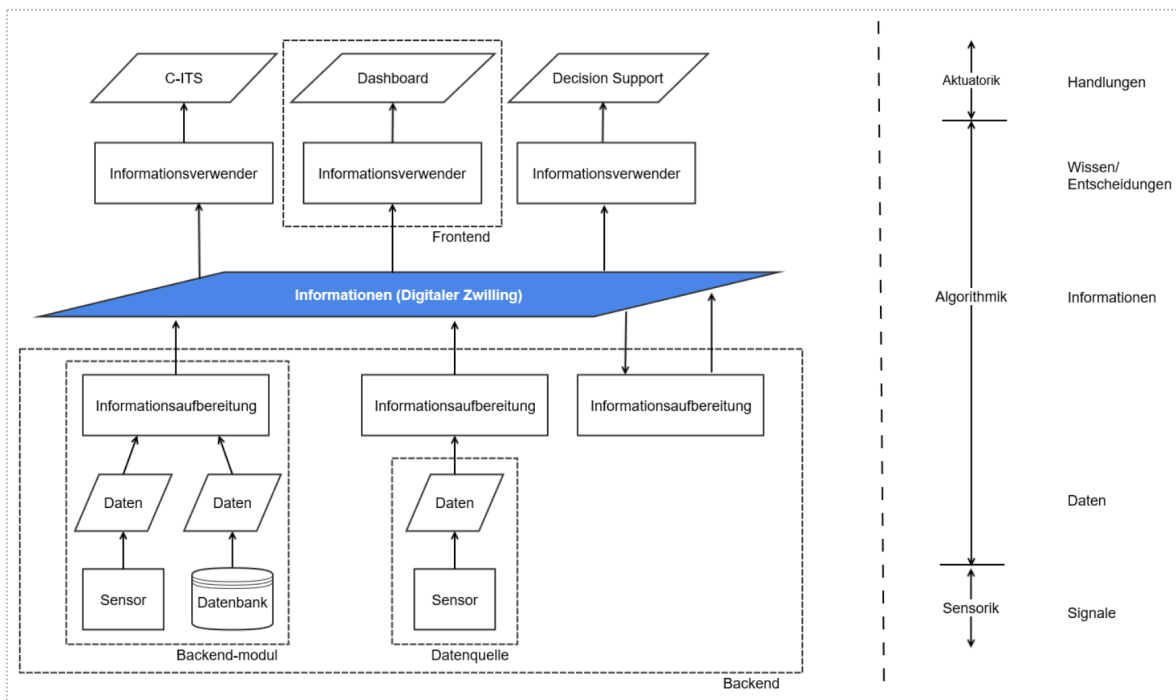


Abbildung 11 Architekturkonzept Digitaler Zwilling in DIGEST

In diesem Modell fließt der Inhalt im Allgemeinen von unten nach oben. Backends nutzen potenziell mehrere Datenquellen (z. B. Sensoren, Datenbanken, C-ITS-Nachrichten), um Informationen zu verarbeiten. Dies kann z. B. Filterung, Rauschunterdrückung, Sensorfusion, Fehlerbehandlung, Ersatz fehlender Werte, Schätzung von Fehlergrenzen oder Vorhersage umfassen. Als Anbieter von Informationen in diesem Schema muss ein Backend den relevanten Teil des Informationsmodells kennen und eine konforme Parametrisierung implementieren. Ein Backend kann auch sensorlos sein und als virtueller Sensor fungieren, der sich nur auf die von anderen Backends bereitgestellten Informationen stützt und diese zu Informationen auf höherer Ebene aggregiert, wie in Abbildung 11 durch das Backend ganz rechts dargestellt. Bis zu diesem Punkt kann die Informationsschicht als *Digitaler Schatten* nach Kritzinger 2018 [19] bezeichnet werden, da sie ein automatisch erstelltes Abbild der realen Welt ist. Ein digitaler Zwilling erfordert zusätzlich eine automatisierte Rückkopplung in die reale Welt, was eine Aufgabe des Frontends sein kann. Es ist zu beachten, dass durch die automatische Rückkopplung in die reale Welt Regelkreise entstehen können, was zeigt, dass ein Kontrollsystem gemäß dieser Architektur implementiert werden kann.

Ein Frontend schneidet die bereitgestellten Informationen auf die Bedürfnisse eines bestimmten Akteurs zu. Zu seinen Aufgaben gehören der Austausch relevanter Aspekte über ein Netzwerk, die Visualisierung, Überwachung und Auswertung, der Vorschlag bestimmter Handlungsoptionen als Entscheidungsunterstützungssystem bis hin zur vollautomatischen Entscheidung und Auslösung entsprechender Aktionen. Zu den Aufgaben eines Frontends gehören auch die Einhaltung relevanter Standards und Formate, z.B. wenn Informationsaspekte über standardisierte Netzwerkprotokolle oder C-ITS-Nachrichten, die von einer Roadside Unit (RSU) gesendet werden, zur Verfügung gestellt werden sollen. Zusätzlich müssen anwendungsspezifische Rollen- und Berechtigungskonzepte durch das Frontend bereitgestellt werden. Es ist zu beachten, dass die Architektur nicht vorschreibt, dass ein Frontend seinen gesamten Input aus der Informationsschicht beziehen muss. Wenn beispielsweise ein Überwachungssystem die Einbindung von Live-Kamerabildern erfordert, können diese natürlich direkt vom Frontend abgegriffen werden und müssen nicht in der Informationsschicht zur Verfügung gestellt werden. Im Gegenteil: Ein Kamerabild erfüllt nicht die Anforderungen an Informationen (siehe 3.2.2), sondern ist eher als Signal einzustufen.

Die Informationsschicht ist in dieser Architektur von zentraler Bedeutung. Wenn die Informationsmodelle ausreichend standardisiert sind, können Front- und Backends als modulare Komponenten wiederverwendet werden, um konkrete Systemrealisierungen zu schaffen (vorausgesetzt, die spezifischen technischen Randbedingungen sind ausreichend ähnlich). Dies unterstreicht einmal mehr die Notwendigkeit von sauberen und standardisierten Informationsmodellen. Die vorgeschlagene Architektur ermöglicht die modulare Entwicklung und den Betrieb eines solchen CCAM DSP.

### 3.2.8. Abgleich Architekturkonzept mit den Anforderungen

Im Projekt DIGEST wurde Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA) zur Realisierung der Informationsschicht eingesetzt. Wie beschrieben, ist die Informationsebene der Dreh- und Angelpunkt der vorgeschlagenen Architektur. Daher ist die Auswahl einer geeigneten technologischen Grundlage entscheidend für eine erfolgreiche Umsetzung. Auf den ersten Blick kommen viele Technologien aus den Bereichen Industrial Internet of Things, Semantic Web, Cloud Computing oder Datenbanken in Frage. **Unter diesen erfüllt die Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA) das gesamte Spektrum der Anforderungen** aus Abschnitt 3.2.5 (Abbildung 10 Anforderungen für technische Umsetzung eines Digitalen Zwillings). OPC UA ist kein Protokoll, kein Datenformat, kein Werkzeug und kein einzelner Standard, sondern ein **Ökosystem**, das alle diese Elemente für die Entwicklung von Anwendungen umfasst, die interoperabel und herstellerunabhängig sind. Er definiert eine standardisierte serviceorientierte Architektur, die einen plattformunabhängigen Datenaustausch ermöglicht. Sie ist der De-facto-Standard in der Prozess- und Maschinenautomatisierung und hat einige Eigenschaften, die für die vorliegende Anwendung geeignet sind. Im Folgenden wird diese Aussage durch die Überprüfung von OPC UA anhand der Anforderungen aus Abbildung 10 Anforderungen für technische Umsetzung eines Digitalen Zwillings untermauert.

- A01 Erweiterbar: OPC UA Informationsmodelle haben die Fähigkeit, Informationen hinzuzufügen und zu durchsuchen (sogar zur Laufzeit) und sind in modularen Namensräumen organisiert.

- A02 Modularität und Wiederverwendbarkeit von Front- und Backends hängen in erster Linie von der Reife der Informationsmodellstandards ab. OPC UA ermöglicht domänenspezifische Erweiterungen des Standards durch sogenannte Companion Specifications.
- A03 Verteilbar: Beide von OPC UA eingesetzten Kommunikationsparadigmen (Client/Server und Pub/Sub) sind von Natur aus netzwerkbasierend.
- A04 Flexibilität: Anwendungen aus der Prozessautomatisierung reichen über zehn Millionen Datenpunkte, die im Sekundentakt verarbeitet werden. Eine aktuelle Erweiterung von OPC UA auf Echtzeit- Ethernet (Time Sensitive Networking TSN) zielt auf Zykluszeiten bis in den Mikrosekundenbereich.
- A05 Hardware-neutral: Server-Profile und verschiedene Varianten von SDK und Tooling ermöglichen die Anpassung der Software an spezifische Anwendungsfälle und Randbedingungen, z.B. erlaubt das Micro Embedded Device Server-Profil ein Downscaling auf sehr begrenzte Rechen- und Speicherressourcen. Anwendungen in der Maschinen- und Fabrikautomatisierung nutzen eine große Vielfalt an Rechenressourcen, von kleinen dezentralen Prozessoren bis hin zum Cloud-Computing.
- RT01 Unterschiedliche Zeitskalen: Pub/sub, zusammen mit der neueren Erweiterung von OPC UA auf deterministisches Ethernet (Time Sensitive Networking TSN) ermöglichen Echtzeitanwendungen mit einer Zykluszeit von weniger als einer Millisekunde. OPC UA Companion Spezifikationen ermöglichen die Integration verschiedener herstellereigener Feldbusse.
- RT02 Unterschiedliche Zykluszeiten: Es werden asynchrone und synchrone Operationen unterstützt, sowie Ereignisse.
- RT03 Echtzeitgarantien sind möglich, wenn ausreichende Hardware-, Software- und Netzwerkressourcen und -technologien durchgängig bereitgestellt werden. Es kann erwartet werden, dass OPC UA TSN entsprechende Konfigurationen unterstützt.
- DS01 Robust in Bezug auf die Verfügbarkeit der Quelle: Kann durch die Verwendung von Zeitstempeln und Qualitätsmetadaten der Quelle erreicht werden. DS02 Verarbeitungsketten: Informationen können von gleichzeitigen Prozessen geschrieben und gelesen werden, z.B. von separaten Backends.
- S01 Authentizität: Zertifikatsbasierte Authentifizierungsverfahren werden bereitgestellt

- S02 Vertraulichkeit und S03 Integrität: Der Lese- und Schreibzugriff kann über ein anpassbares Rollenschema pro Datenpunkt gesteuert werden.
- IT01 Available und IT02 Maintainable sind allgemeine Anforderungen in der Fabrik- und Maschinenautomatisierung, für die OPC UA entwickelt wurde. So können beispielsweise Funktionen wie Serverredundanz, ergänzt durch herstellerspezifische Netzwerk-Redundanztechniken, die Verfügbarkeit verbessern.
- F01 Interoperabel: OPC UA wurde entwickelt, um Komponenten und Maschinen von verschiedenen Herstellern austauschbar und interoperabel zu machen. Dies wird hauptsächlich durch ergänzende Spezifikationen erreicht, die domänenspezifische Informationsmodelle als Erweiterungen der Kernstandards unterstützen.
- F02 Informationsqualität: Die Angabe des Alters/der Aktualität eines Datenpunktes sowie die Kodierung fehlender Werte werden nativ unterstützt, die Unsicherheit kann individuell modelliert werden.
- F03 Metadaten: OPC UA definiert eine Sprache zur Informationsmodellierung, die selbstbeschreibende Informationsmodelle und den Ausdruck von Semantik (z.B. Einheiten, Beziehungen, ...) ermöglicht.

Wie gezeigt, erfüllt OPC UA die oben genannten Anforderungen in der Theorie. Um die Eignung in der Praxis zu untersuchen, wurden mehrere Demonstranten aufgebaut.



### 3.2.9. Validierung des Konzepts

Zur Validierung des Konzepts wurde einerseits ein Peer Review durchgeführt und andererseits anhand mehrerer Demonstratoren mit heterogenen Anwendungsfällen und Anforderungen die praktische Umsetzbarkeit nachgewiesen.

Das DLR hat das erarbeitete Konzept intern sowie mit ANDATA diskutiert und in verschiedenen Gedankenexperimenten exemplarisch angewendet. Im Rahmen eines praktischen Experimentes hat das DLR das Konzept als Prototypen implementiert. Der Prototyp benutzt Daten aus dem Testfeld Niedersachsen und modelliert diese im internen Strukturmodell des OPC UA Servers auf Informationsebene. Über einen entwickelten Konnektor zur bestehenden Infrastruktur werden die Daten abgerufen, zu Informationen verarbeitet und im Server gespeichert. Zur Demonstration wurden verschiedene Frontend Visualisierungen erstellt, welche die enthaltene Information darstellen.

Die Vielfältigkeit und Anwendbarkeit des Konzepts konnte durch die Modellierung verschiedener Perspektiven bzw. Anwendersichten demonstriert werden. Durch diese Arbeiten konnte das erstellte Konzept positiv evaluiert werden.

Die gemäß der Architektur ausgeführten Demonstratoren werden in Kapitel 3.4 im Detail vorgestellt.

### 3.3. Rollenmodell

Die CCAM DSP ist eine Plattform bzw. Architektur, die Informationen für unterschiedliche Anwendungsfälle bereitstellen soll (siehe Abschnitt 3.1 Stakeholderanalyse). Ein wesentliches Ergebnis aus der Stakeholderanalyse ist die Ableitung von unterschiedlichen Rollen, die für einen Betrieb einer CCAM DSP notwendig und überblicksmäßig in nachfolgender Abbildung<sup>12</sup> dargestellt sind.

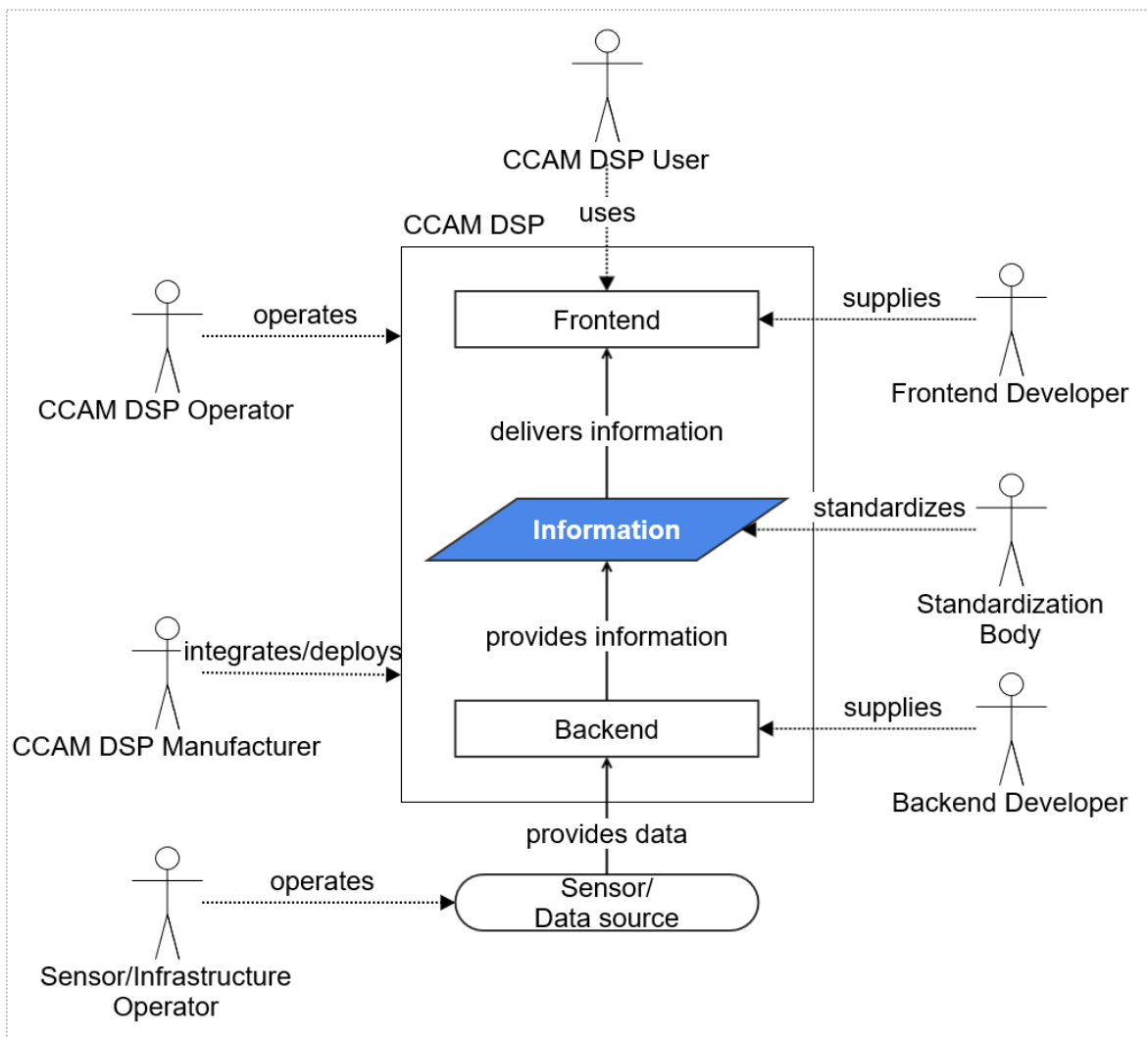


Abbildung12 Rollenmodell eines DZ/CCAM DSP in DIGEST

Unterschiedliche Rollen können unterschiedlichen Ebenen der Wissenspyramide (Abbildung 9) zugeordnet werden, beispielsweise liefern Sensoren Zeichen oder Daten, aus denen Informationen abgeleitet werden, die ein DZ-Anwender im situativen Kontext zur Bildung von Wissen bzw. zum Treffen von Entscheidungen nutzt. Die einzelnen Rollen und

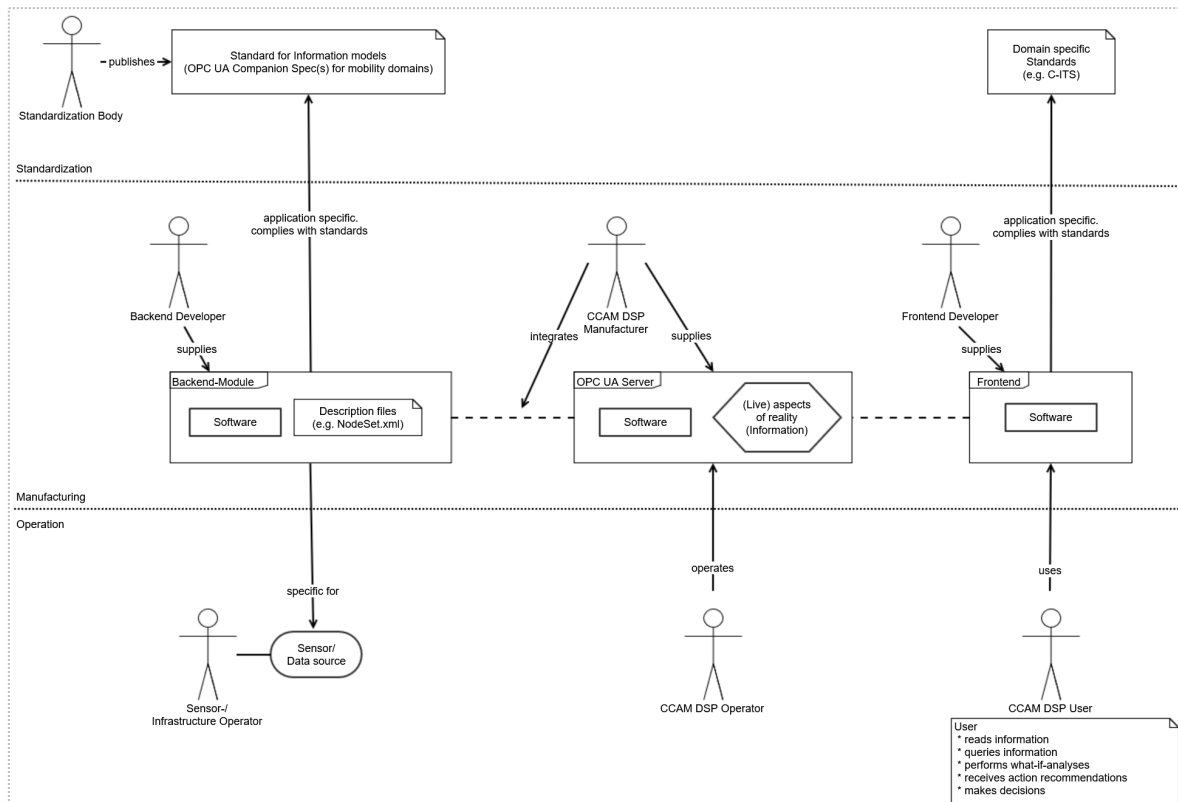
deren Aufgaben im Rahmen der Herstellung und des Betriebs einer CCAM DSP werden in nachfolgender Tabelle 3 Rollen in Umsetzung und Betrieb eines Digitalen Zwillings Tabelle 3 im Überblick beschrieben. Die Detailbeschreibung je Rolle wird in den nachfolgenden Unterkapiteln behandelt.

**Tabelle 3 Rollen in Umsetzung und Betrieb eines Digitalen Zwillings**

<b>Rolle</b>	<b>Beschreibung</b>
CCAM DSP User	Ein CCAM DSP User trifft Anwendungsfallbezogene Entscheidungen (die je nach Anwendung sehr unterschiedlich sein können). Die CCAM DSP stellt Informationen, aufbereitet in einem Frontend zur Verfügung, die das Treffen der Entscheidungen ermöglicht oder deren Qualität erhöht.
Frontend Developer	Ein Frontend Developer entwickelt ein Frontend gemäß den Anforderungen, die sich aus den Aufgaben des CCAM DSP User ergeben. Es soll Information derart aufbereiten, dass der User diese bestmöglich erfassen und nutzen kann.
Standardization Body	Die Aufgabe des Standardization Bodys ist es, Standardisierung der Informationsmodellierung derart voranzutreiben, dass Interoperabilität von CCAM DSPs ermöglicht wird und sowohl Backends als auch Frontends modular entwickelt werden können.
Backend Developer	Ein Backend Developer entwickelt Backends, also Algorithmen/Softwarepakete, die aus Daten Information extrahieren bzw. Informationen aggregieren oder fusionieren, und diese dem Informations-Pool zuführen.
Sensor/Infrastructure Operator	Ein Sensor/Infrastructure Operator betreibt Sensoren und Infrastruktur, die zum Erfassen von Daten notwendig ist. Dieser stellt sicher, dass die Datenerfassung die Anforderungen bez. Level of Service einhält und ist Ansprechpartner bei Problemen der Datenerfassung.

CCAM DSP Manufacturer	Ein CCAM DSP Manufacturer erstellt eine CCAM DSP als Gesamtsystem durch Integration der Komponenten. Beim Manufacturer liegt auch die Definition der passenden IT und Netzwerkarchitektur für die geplanten Anwendungen.
CCAM DSP Operator	Ein CCAM DSP Operator betreibt ein CCAM DSP (Gesamt)System und stellt dadurch Dienste für CCAM DSP User bereit.

Aus den Rollenbeschreibungen lässt sich nun gut ableiten, welche Verantwortlichkeit im Betrieb, bei der Erstellung und im Rahmen von Standardisierung welchen Rollen zufällt. Abbildung 13 zeigt diese Zusammenhänge.



**Abbildung 13 Rollendarstellung und Mapping der Verantwortlichkeiten in Betrieb, Herstellung und Standardisierung**

Im Folgenden werden für jede Rolle Details zu Aufgaben und Zuständigkeiten sowie technische Überlegungen angeführt.

### 3.3.1. CCAM DSP User

#### *Verortung in der Wissenspyramide*

Der User nutzt die im Frontend aufbereitete Information um daraus Wissen und in weitere Folge auch Handlungen abzuleiten, siehe Abbildung 13. Dies kann durch Menschen, teilautomatisiert oder sogar vollständig automatisiert durch den CCAM DSP unterstützt werden.

#### *Aufgaben und Zuständigkeiten*

Der CCAM DSP User ist Anwender\*in bzw. Nutzer\*in der CCAM DSP. Dabei ist ein breites Spektrum unterschiedlicher Anwender angedacht (Abschnitt Stakeholderanalyse), z.B. kann ein hochautomatisiertes Fahrzeug, menschliche Fahrer\*innen, Leitstellenmitarbeiter\*innen oder Bauplaner\*innen CCAM DSP User sein.

All diese User haben gemeinsam, dass sie Informationen aus der CCAM DSP für ihre Entscheidungsfindung verwenden. Daher ist diese so gestaltet, dass die Entscheidungen, die der User zu treffen hat, durch die CCAM DSP bestmöglich unterstützt werden. Dies kann z.B. durch zur Verfügungstellung von einem aktuellen Lagebild, durch Prognosen über die künftige Entwicklung oder durch Vorschlag von konkreten Handlungsempfehlungen geschehen.

Im Falle der vollständig automatisierten Handlungsentscheidung ist die CCAM DSP als *Digitaler Zwilling* im Sinne von Kritzinger, 2018 [19] einzustufen, im Fall der nicht automatisierten Ableitung von Handlungen ist die CCAM DSP hingegen ein *Digitaler Schatten*.

Bei technischen Problemen ist der Betreiber der CCAM DSP (CCAM DSP Operator) primärer Ansprechpartner des Users und im Idealfall dessen Single Point of Contact (siehe Kapitel 3.5)

#### *Architektonische und technische Überlegungen*

Ein User nutzt in der Regel ein für seinen Anwendungsfall spezifisches Frontend. Dies erlaubt es ihm, die aktuell relevanten Informationen übersichtlich und kontextual zu erfassen, um die aktuelle Situation zu beurteilen bzw. anstehende Entscheidungen zu treffen und Handlungen einzuleiten.

### 3.3.2. Frontend Developer

#### *Verortung in der Wissenspyramide*

Das Frontend bildet die „Brücke“ von der generischen Informationsebene zur anwendungsfall-abhängigen Wissens bzw. Entscheidungsebene. Dies schließt die Einbeziehung von situativem Kontext ein.

#### *Aufgaben und Zuständigkeiten*

Der Frontend Developer erstellt Anwendungsfall-spezifische Interfaces für den CCAM DSP User. Dabei sind alle User-Anforderungen, die sich auf die Darstellung der Informationen beziehen, zu berücksichtigen. Abhängig vom User kann ein Frontend z.B. eine Road Site Unit sein die laufend Informationen via C-ITS zur Verfügung stellt, oder ein Dashboard, das ein aktuelles Lagebild visualisiert, oder auch ein Monitoring-System, das die Situation laufend analysiert und bei Anomalien oder menschlichen Eingriffsbedarf entsprechend informierend tätig wird.

#### *Architektonische und technische Überlegungen*

Das Frontend kann unterschiedliche Quellen nutzen und muss nicht zwingend alle Informationen aus dem Informationspool des OPC UA Servers beziehen. Beispielsweise wäre es technisch im Allgemeinen nicht sinnvoll, Livebilder aus Verkehrskameras über den OPC UA Server zu „schleifen“. Darüber hinaus stellen Livebilder auch keine Informationen im engeren Sinne dar. Insoweit die Informationen für das Frontend aus dem OPC UA Server kommen, kann durch standardisierte Informationsmodelle die Wiederverwendbarkeit von Frontendsystemen und somit die Modularität des Gesamtsystems unterstützt werden. Je nach Anforderungen des Anwendungsfalls können passende OPC UA Übertragungsoptionen vom Server zum Frontend genutzt werden: Verschlüsselt oder als Klartext, Subscriptions für Event-basierte Updates, normales Read für updates on demand, Pub/Sub für zyklische Echtzeitinformationen. Umfasst der Anwendungsfall komplexe Abfragen, so kann das Frontend auch die Skalierung von Aspekten des Gesamtsystems unterstützen, z.B. könnte in einem Routenplanungssystem die Verkehrslage zwischengespeichert werden und niedrigerfrequenter (z.B. alle 15min) mit dem OPC UA Server abgeglichen werden, anstelle die Information bei jeder Routing-Anfrage direkt aus dem OPC UA Server zu lesen. Im Frontend sind je nach Anwendungsfall auch Mechanismen wie ein Rollen-

und Zugriffssystem für die User umzusetzen. Dabei kann allerdings das Rechtesystem von OPC UA unterstützen.

### 3.3.3. Standardization Body

#### *Verortung in der Wissenspyramide*

Informationsmodelle sowie ihre Standardisierung sind in der Wissenspyramide auf der Ebene *Information* einzuordnen.

#### *Aufgaben und Zuständigkeiten*

Die Informationsebene spielt eine zentrale Rolle für die Interoperabilität und Modularität der CCAM DSP Backends und Frontends. Parametrierung von Information ist im Allgemeinen eine kreative Engineering Aktivität, was häufig zu individuellen Lösungen führt, die kaum interoperabel sind. Dies zeigt die Bedeutung der Standardisierung in diesem Bereich. Leider herrscht teilweise auch bei existierenden Standards noch einiges an Nachholbedarf, siehe z.B. Abschnitt Ungelöste Probleme und Kritik an . Um die Informationsmodell-Standardisierung voranzubringen, wurden im Projekt DIGEST Anforderungen an die Informationsmodellierung erarbeitet und konsolidiert, die sich zum Zeitpunkt der Berichtslegung im Veröffentlichungsprozess bei einem relevanten Journal befindet (Thonhofer et al.). Selbst bei Erfüllung aller formulierten Anforderungen (siehe Abschnitt Informationsmodellierung) bleibt die Parametrierung einer gewissen Willkürlichkeit unterworfen. Die Freiheitsgrade bei der Modellierung der Information sollen durch entsprechende Standardisierung zugunsten der Interoperabilität reduziert werden. Insbesondere bei in vielen Anwendungsfällen wiederkehrenden Elementen wie z.B. einer Straßen-Kilometrierung ist der Bedarf an Standardisierung entsprechend hoch.

#### *Architektonische und technische Überlegungen*

OPC UA unterstützt die Standardisierungsaktivitäten einerseits dadurch, dass es eine Sprache für Informationsmodelle definiert und andererseits durch Definition eines Rahmens für Erstellung von Anwendungsfall-spezifischen Standard-Erweiterungen, so genannten *companion specifications*. In manchen Situationen ist es aus inhaltlichen oder technischen Gründen nicht möglich, eine einzelne spezifische Parametrierung für eine gegebene Information festzulegen. Zum Beispiel gibt es Fälle, bei denen ein und

dieselbe Information in einem Anwendungsfall zweckmäßigerweise ganz anders zu parametrieren ist als in einem anderem Anwendungsfall (z.B. beim automatisierten Fahren Objektlisten vs. Belegungskarten). Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Standardisierung stets vom Anwendungsfall heraus angestoßen werden muss, und nicht etwa aus den Datenquellen heraus.

### 3.3.4. Backend Developer

#### *Verortung in der Wissenspyramide*

Ein Backend bildet Zeichen bzw. Daten auf Informationen ab. Dazu nimmt es Inputs aus Quellen wie beispielsweise Sensoren oder Datenbanken, leitet daraus Informationen als Output ab und stellt diese via OPC UA zur Verfügung.

#### *Aufgaben und Zuständigkeiten*

Der Hersteller des Backends ist für einen wesentlichen Teil der Gesamtfunktionalität einer CCAM DSP verantwortlich. Zu den Aufgaben gehören Information Modeling bzw. Datenquellen-agnostisches Information Design, dabei die Berücksichtigung entsprechender Standards (sofern vorhanden), Fusion verschiedener Quellen, Aggregation auf höhere Bedeutungsebenen, zeitliche Aggregation, die Umsetzung virtueller Sensoren, die nicht direkt messbare Größen liefern, die Umsetzung von Prognosemodellen und die Schätzung bzw. Beurteilung der Unsicherheit der resultierenden Informationen. In der technischen Umsetzung schließen die Aufgaben auch die Anbindung der Datenquellen ein sowie je nach Anwendungsfall die Einhaltung von (Echt)Zeitgarantien, die Synchronisation, Intra-/Extrapolation, sowie die Gewährleistung von Konsistenz der Informationen.

#### *Architektonische und technische Überlegungen*

Die Lieferung der Informationen an den OPC UA Server kann über OPC UA Standardmechanismen ausgeführt werden: OPC UA Write für z.B. aperiodische Daten oder Pub/Sub für zyklische Echtzeitdaten oder bei Broadcasts an viele Frontends. Je nach Anwendungsfall kann optional verschlüsselte Übertragung eingesetzt werden oder eine beiderseitige Authentifizierung zwischen Backend und Server erforderlich werden. Die Auswahl des Übertragungsmechanismus und auch der konkreten Modellierung bzw. Parametrierung der Information kann sich in manchen Anwendungsfällen aus der



Anforderung der Informationskonsistenz ergeben: Wenn beispielsweise eine Information, deren Parametrierung mehrere reelle Zahlen umfasst, übermittelt wird, so muss atomare oder transaktionsmäßige Updatesemantik garantiert werden.

Für all diese Aspekte bietet OPC UA Mechanismen und Lösungsansätze, die für die Backend-Entwicklung genutzt werden können.

Datenquellen bieten ihre Daten in aller Regel über eine spezielle Schnittstelle an. Es ist Aufgabe des Backends, diese Schnittstelle zu nutzen, um die Daten abzugreifen. Außerdem muss das Backend mit wechselnder Verfügbarkeit der Datenquellen umgehen können. Der Ausfall einer redundanten Datenquelle sollte z.B. nicht in einem Ausfall der daraus abgeleiteten Information, sondern nur in geringerer Informationsqualität (z.B. höherer Unsicherheit, reduzierter Aktualität) resultieren. Ein Backend kann auch „sensorless“ sein, in diesem Fall bezieht es Inputs direkt aus dem OPC UA Server der eigenen CCAM DSP. Dies kann sinnvoll sein, wenn die Aufgabe eines Backends die Aggregation von Informationen ist, die von anderen Backends geliefert werden. Dies ist auch als Verarbeitungskette denkbar, beispielsweise könnte aus einer Objektliste eine Verkehrslage aggregiert werden aus der in einem weiteren Schritt eine Verkehrszählung oder O/D Matrix aggregiert wird. Die unterschiedlichen Aggregationsstufen adressieren jeweils andere User und haben unterschiedliche Anforderungen an Aktualität, Validität und Genauigkeit. Die Ausführung der Aggregationsstufen als einzelne Backends unterstützt die Modularität der Backend-Landschaft.

### 3.3.5. Sensor/Infrastructure Operator

#### *Verortung in der Wissenspyramide*

Sensoren und Infrastruktur (darunter können z.B. auch Kartendienste verstanden werden) sind in der unteren Hälfte der Wissenspyramide einzuordnen. Ein Schleifensensor kann Zeichen liefern, eine Live-Kamera Zeichen oder Daten (die Abgrenzung ist manchmal nicht ganz scharf), eine Straßentopologie-Datenbank kann bereits Informationen liefern.

### *Aufgaben und Zuständigkeiten*

Vordergründige Aufgabe des Betreibers von Sensoren oder Infrastruktur („Datenquellen“) aus Sicht der CCAM DSP ist die Versorgung der Backends mit Input. Dabei können Quality of Service Vereinbarungen die Verfügbarkeit, Genauigkeit, Aktualität usw. regeln.

### *Architektonische und technische Überlegungen*

Datenquellen bieten ihre Daten in aller Regel über eine spezielle Schnittstelle an. Diese Schnittstelle wird von Backends genutzt, um die Daten abzugreifen. Es ist also nicht Aufgabe der Datenquelle, sondern des Backends, die Quell-spezifischen Darstellungen von Messwerten auf Informations-Ebene zu heben. Standardisierung ist dennoch erwünscht wo möglich und sinnvoll, da dies den Anbindungsaufwand einer Quelle auf Backend-Seite erleichtert.

## 3.3.6. CCAM DSP Manufacturer

### *Verortung in der Wissenspyramide*

Die Herstellerin einer CCAM DSP hat die Integrations- und Gesamtsystemverantwortung, daher umfasst ihr Interesse alle Ebenen der Wissenspyramide.

### *Aufgaben und Zuständigkeiten*

Die Aufgaben der Herstellerin umfassen alle Aspekte, die das Gesamtsystem betreffen, darunter anwendungsfallbezogene Anforderungsanalyse, Entwicklung und Spezifikation der Architektur und der Schnittstellen, Auswahl geeigneter (Hard- und Software) Komponenten und Technologien, Koordination der Entwicklung, Integration der Komponenten, end-to-end Systemtests, Zertifizierung, Systemdokumentation und Installation.

### *Architektonische und technische Überlegungen*

Anforderungen an das Gesamtsystem wie Skalierbarkeit (z.B. hinsichtlich der Anzahl gleichzeitig aktiver User), Redundanzen (z.B. hinsichtlich der Sensorik), Latenzen (end-to-end) bestimmen die Ausgestaltung des konkreten CCAM DSP Systems.

Beispielsweise kann es für anspruchsvolle Echtzeitanwendungen, die eine end-to-end Latenzgarantie erfordern, notwendig sein, die Implementierung von Front- und Backends auf echtzeitfähiger Hard- und Software aufzubauen. Da OPC UA als Technologie ihre Ursprünge im Bereich der Maschinen- und Industrieautomatisierung hat, sind viele kompatible Komponenten von Automatisierungstechnikherstellern verfügbar. Dies umfasst auch die optionale Möglichkeit, OPC UA mit echtzeitfähigem Ethernet (time sensitive networking TSN) zu kombinieren, um viele Netzwerktechnische Herausforderungen bei der Realisierung von Echtzeit- oder Mischanwendungen zu überwinden.

Ebenso bietet die Technologie OPC UA bzw. Komponentenlieferanten (Teil-) Lösungen für die Realisierung von Rechte- und Rollensystemen, Alarmsystemen, regionale Lokalisierung (Sprachen und Einheitensysteme) oder der Erstellung von systemweiten Securitykonzepten inklusive Authentifizierung, Verschlüsselung und einem Konzept für die Schlüssel-Management einer Public Key Infrastructure. Auch für Redundanz- und Skalierungsanforderungen (Netzwerkredundanz, Hardwareredundanz, Serverredundanz) halten OPC UA bzw. entsprechende Komponentenlieferanten entsprechende Möglichkeiten vor.

Simulation, Inbetriebnahme, Diagnose und Monitoring eines Gesamtsystems können sich ebenso als signifikante Herausforderung erweisen, besonders wenn es stark verteilt ist. Auch für diese Aspekte existieren Methoden und Werkzeuge, auf die ein CCAM DSP Manufacturer bei Notwendigkeit zurückgreifen kann.

### 3.3.7. CCAM DSP Operator

#### *Verortung in der Wissenspyramide*

Der Betreiber einer CCAM DSP tritt gegenüber den Usern als Service Provider und gegenüber den Sensorbetreibern als Kunde auf. Diese Rolle lässt sich kaum auf eine bestimmte Ebene der Wissenspyramide eingrenzen.

#### *Aufgaben und Zuständigkeiten (mit Links auf Betreibermodell-Kapitel)*

Die Aufgaben des CCAM DSP Operators umfassen den Kontakt mit dem User (einschließlich Benutzer- und Rechteverwaltung, Support und dergleichen), die Verwaltung und Überwachung des Betriebs, Wartungstätigkeiten (etwa

Hardwaretausch, Software updates und patches), Backup und Recovery, sowie die Überwachung und Gewährleistung der systemweiten Security.

### *Architektonische und technische Überlegungen*

Insbesondere das Monitoring der Funktionalität des Gesamtsystems kann bei hochgradig verteilten Systemen eine große Herausforderung darstellen. In der Fabriks- und Prozessautomatisierung wird OPC UA jedoch genau für solche Anwendungen eingesetzt, beispielsweise um den Zustand verschiedener Aggregate und Schaltwerke eines Kraftwerks zu überwachen, und dies unter hohen Anforderungen an Safety und Security.

### 3.3.8. Gegenüberstellung der Rollen zu den Anforderungen

Tabelle 4 stellt dar, wie die beschriebenen Rollen im Verhältnis zu den Anforderungen an eine technische Realisierung (Kapitel Anforderungen an eine technische Realisierung) stehen. Dabei wird unterschieden, ob eine Rolle eine Anforderung hat (Requires) oder sie erfüllt (Provides). Es gibt auch Fälle, in denen eine Rolle sowohl die Anforderung (auf Systemebene) umsetzt als sie auch als Anforderer (an Komponenten) weitergibt (R&P).

**Tabelle 4 Rollen vs. Anforderungen**

		CCAM DSP User	Frontend Developer	Standardization Body	Backend Developer	Sensor/Infrastructure Operator	CCAM DSP Manufacturer	CCAM DSP Operator
A01	Extensible		P	P	P		P	R
A02	Modular and reusable		P	P	P	P	R&P	R
A03	Distributable				P		P	R
A04	Flexibility	R	P		P		P	R
A05	Hardware-neutral						P	R
RT01	Different time scales	R	P		P		R&P	R
RT02	Different cycle times	R	P				R&P	R
RT03	Real-time capable	R	P		P	P	R&P	R
DS01	Robustness	R	R&P		P		R&P	R&P
DS02	Processing chains				R&P		R&P	
S01	Authenticity	R	R&P		P	P	R&P	R&P
S02	Confidentiality	R	P				P	R&P
S03	Integrity	R		P	P	P	P	R&P
IT01	Available	R	R&P		P	P	R&P	R&P
IT02	Maintainable		P		P	P	R&P	R
F01	Inter-operable		R	R&P	P		P	R
F02	Information quality	R	R	P	P	P	P	
F03	Metadata	R	R	R	P	P	P	
			R... Requires		P... Provides			

Hierbei gibt es für jede Anforderung mindestens eine Rolle, die sie hat (R) und mindestens eine, die sie erfüllt (P). Ansonsten würde es überflüssige oder unerfüllte Anforderungen geben und die eine oder andere Dimension eine Lücke aufweisen.

### 3.4. Demonstratoren

Es konnten folgende drei Demonstratoren konform zur DIGEST Architektur umgesetzt werden:

1. Ein Demonstrator „A10 - Tunnelbaustelle“, erweitert um Informationsgruppen aus dem ESRIUM Projekt, die auf der A9 und der A10 relevant sind
2. Ein Demonstrator „Testfeld Niedersachsen“
3. Ein Demonstrator „COPE – Collective Perception“, der im Rahmen des Projekts COPE [16] entwickelt wurde, aber auf der in DIGEST entwickelten Architektur basiert. Dieser wurde im Rahmen einer ATTC Live Veranstaltung im Okt. 2022 vorgeführt (In diesem Bericht nicht adressiert).

Deren Datenquellen sowie Frontends sind in schematisch in Abbildung 14 dargestellt.

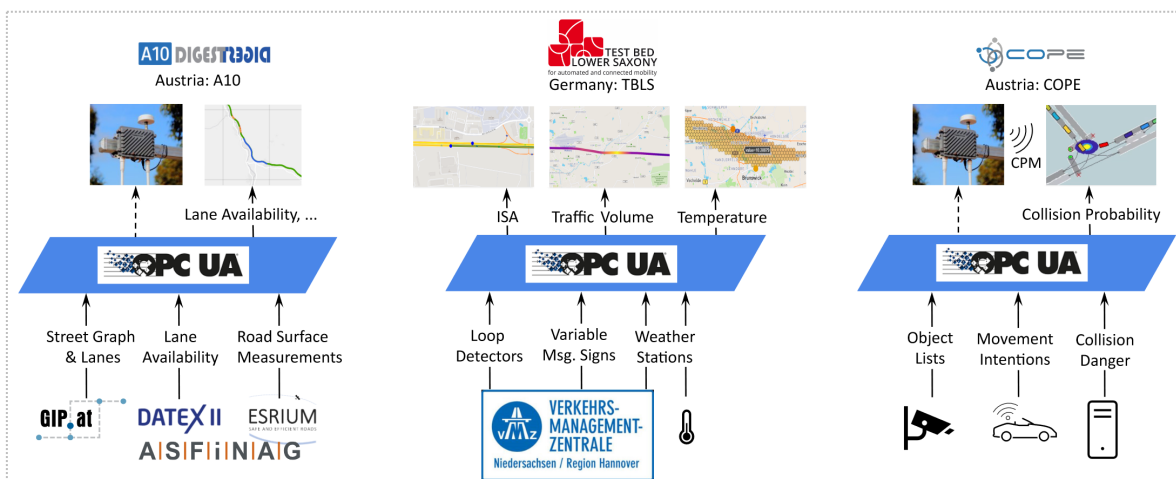


Abbildung 14 Schematische Darstellung der drei umgesetzten Demonstratoren (aus Thonhofer et al. [23])

Zusätzlich sind in Tabelle 5 die technischen Details der Demonstratoren zusammengefasst. In den folgenden Abschnitten werden die beiden Demonstratoren „A10 - Tunnelbaustelle“ und „Testfeld Niedersachsen“, die im Rahmen von DIEGST entstanden sind, im Detail beschrieben.

**Tabelle 5 Überblick über die drei Demonstratoren auf Basis des DIGEST Konzeptes (aus Thonhofer et al. [23])**

	Austria A10	TBLS A2	COPE
Users	Automated vehicles	Automated vehicles as well as infrastructure managers	Automated vehicles
Frontend	RSU, dashboard	RSU, dashborad	RSU, dashboard
Domain	Highway	Highway	Urban
Region	Tunnel construction site A10, Austria	Test Bed Lower Saxony A2, Germany	Hallein and Linz, Austria
Implementation	open62541, MATLAB®	FreeOpcUa, Python	open62541, MATLAB®, Python
Information groups	Topography, lane availability, POI, road surface characteristics	Traffic volume and speeds, content of variable message signs, weather information, metadata	Object list, object dynamics, movement predictions, collision risk, map
Information dynamics	≈ 15 Minutes	Seconds	≪ 1 Second
CPU for OPC UA Server	Intel(R) Xeon(R) CPU E3-1225 V2 @ 3.20GHz	Intel Xeon Gold 6126 @ 2x 2.594GHz	Intel(R) Xeon(R) CPU E3-1225 V2 @ 3.20GHz
CPU for Backends	Intel(R) Xeon(R) CPU E3-1225 V2 @ 3.20GHz	Intel Xeon Gold 6126 @ 2x 2.594GHz	Intel(R) Xeon(R) CPU E3-1225 V2 @ 3.20GHz
CPU for Frontends	Intel(R) Core(TM) i7-11850H @ 2.50GHz	Intel(R) Core(TM) i7-8665U CPU @ 1.90GHz	Intel(R) Core(TM) i7-11850H @ 2.50GHz
algorithm complexity of backend	$\mathcal{O}(n_{\text{events}})$	$\mathcal{O}(n_{\text{events}})$	$\mathcal{O}(n_{\text{vehicles}}^2)$
data to information latency	< 20s	< 10s	< 100 ms
data traffic volume	< 150 kByte/sec	< 10 kByte/sec	≈ 1.25 MByte/sec

### 3.4.1. Demonstrator A10 – Tunnelbaustelle

Der Demonstrator „A10 - Tunnelbaustelle“ soll automatisierte Fahrzeuge beim Durchfahren einer Autobahn-Tunnelbaustelle unterstützen. Der Streckenabschnitt der Tunnelbaustelle ist in Abbildung 15 dargestellt und umfasst den Bereich vom Ofenauer Tunnel (Portal Nord) bis zum Hiefler Tunnel (Portal Süd).



**Abbildung 15 Bereich der A10 Tunnelbaustelle: Ofenauer Tunnel (links unten) bis Hiefler Tunnel (rechts oben)**

### 3.4.2. Demonstrator A10 – Relevante Informationsgruppen

Zur Unterstützung autonomer Fahrzeuge müssen zunächst folgende Aspekte strukturiert werden:

- durch das autonome Fahrzeug zu erfüllende Aufgaben, die Herausforderungen dabei
- die zugehörigen Informationsgruppen
- der Unterstützungsbedarf, der bei diesen Aufgaben besteht



- deren "Störungs- oder Gefahrenpotential"

Aus diesen Aspekten lassen sich jene Informationen identifizieren, die vorteilhaft in einem Demonstrator umsetzbar sind. Diese Aufgaben sind in Tabelle 6 gelistet, deren Unterstützungsbedarf sowie die zugehörigen Informationsgruppen identifiziert und deren Störungspotential abgeschätzt. Jene Informationsgruppen, die daher sinnvoll und im Rahmend es Projektes umsetzbar sind, sind in den Tabellen fett markiert.

**Tabelle 6 Aufgaben autonomer Fahrzeuge beim Durchfahren einer Baustelle und deren Unterstützungsbedarf**

Ebene der Fahrzeugführung	Betroffener Task (Perception)	Beispiele für Herausforderungen	Beteiligte Information(sgruppe)	Unterstützungsbedarf (des AD-Fahrzeugs)	Sicherheitsrelevanz	Verkehrliches Störpotenzial	
Navigation (~5min)	Karten "lesen/verstehen"	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aktualität der Karteninformation</li> <li>Umleitungen</li> <li>Verfügbarkeit digitaler Infrastruktur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Topologische Information</li> </ul> Anm.: Auch ISAD-Inhalte (Services, ...)	Mittel-Hoch	Niedrig	Mittel (Marktdurchdringungsabhängig)	
	Wahrnehmung von Routen(abschnitts)eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Ermitteln der Benütz- und Befahrbarkeit</b></li> <li><b>Ist eine Fahrübergabe absehbar? (- ODD / disengagement prediction)</b></li> <li><b>Ermitteln geeigneter minimum risk conditions</b></li> <li>Anpassung gewisser Reservetoleranzen (man kann nicht einfach anhalten)</li> <li>Vorher fragen ob die Kinder auf die Toilette müssen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Routenabschnitts-qualität (Reisezeit, Länge, Kosten (€), Verkehr)</li> <li>Required Capabilities (Rettungsgasse bilden, Mautstelle durchfahren, LKW Kontrollstelle, Autozug, Grenzkontrolle, Polizeikontrolle)</li> <li>Offered Services (Fahrzeuge: Tanken, Nothalteplatz, Benützungsberechtigung erwerben (Maut, Vignette) Menschen: Essen, Fluchtwege/Exits)</li> </ul>	<b>Hoch</b>	Mittel-Hoch	Hoch	
	Wahrnehmung physischen Befahrbarkeit(sgrenzen)		<ul style="list-style-type: none"> <li>Physische Befahrbarkeit(sgrenzen) (Durchfahrtsprofil, Gewicht)</li> </ul>				
	Regel-Wahrnehmung		<ul style="list-style-type: none"> <li>Benützungsregelungen (Fahrzeugtyp, Benützungsberechtigung (Vignette, Maut), Betriebsbewilligung, Quell+Zielverkehr, v_min)</li> </ul>				
Manöver (~30sec)	Regel-Wahrnehmung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Auffahren lassen (Kooperativ verhalten)</li> <li><b>Spurverläufe</b> (sofern das zu Regelwahrnehmung gehört?)</li> <li><b>Temporäre Regeländerungen (Geschwindigkeitsbegrenzung, Überholverbot, ...)</b></li> <li><b>Geänderte Rettungsgassenregelung</b></li> <li>Versetzt Fahren</li> </ul>	Regelungen (Ge-/Verbote) <ul style="list-style-type: none"> <li>Fahrzeugbetrieb</li> <li>Straßenbenützung</li> <li>Bewegungsbezogene Regelungen</li> </ul>	<b>Hoch</b>	(je nach konkreter Regel)	Mittel (Marktdurchdringungsabhängig und abhängig von lokalen Usancen)	
	Wahrnehmung physischen Befahrbarkeit(sgrenzen)		<ul style="list-style-type: none"> <li>Geometrie (geo-located) befahrbarer Flächen, Griffigkeitsbereiche</li> </ul>				
	Umfeldererkennung (statische und bewegliche Objekte)						
Fahrzeugführung (~sec)	Feinlokalisierung (quer)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geringere Spurbreite</li> <li>Technologieabhängig: falls z.B. HD Karten "geslammt" werden</li> </ul>	Eigene Pose	Niedrig-Mittel Durch redundante Lokalisierungssysteme kann etwas geholt werden. (z.B. GPS-Problem bei neben der Autobahn verlaufender Landstraße)	Hoch	Hoch (als Folge von Unfällen)	
	Fahrspurenerkennung	<ul style="list-style-type: none"> <li>widersprüchliche / keine Markierungen / fehlende / versetzte Hüthen</li> <li>unübliche Markierungen (Farben, Reflektivität)</li> <li>Verunreinigungen</li> <li>Abgerissene (geklebte) Markierungen</li> <li>Sichtverhältnisse</li> <li>Weggefäste Markierungen</li> </ul>	<b>Fahrstreifeninformationen</b> (dzt. Teil von Ge- und Verbote)	<b>Hoch</b>	Hoch	Hoch (als Folge von Unfällen)	
	Griffigkeits-Erkennung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Unüblicher Fahrbahnbelag (Fräskanten, abgelöste Fahrstreifenmarkierungen, Verschmutzung, ...)</li> <li>Fräskanten</li> </ul>		Niedrig-Mittel			
	Umfeldererkennung (statische und bewegliche Objekte, befahrbare Flächen)	<ul style="list-style-type: none"> <li>andere (temporäre, unüblich montierte) Schilder</li> <li>Sichtbehinderung (Staub, ...)</li> </ul>	(quasi-)statische und dynamische Objekteigenschaften	Niedrig	Hoch	Hoch	

In enger Zusammenarbeit mit den Kollegen der ASFINAG wurden daraufhin die verfügbaren Daten und daher die beispielbaren Informationsgruppen ermittelt und entsprechende Zugänge zu den Daten-Streams ermöglicht.

### 3.4.3. Demonstrator A10 - Informationsmodell

Die als relevant identifizierten Informationsgruppen müssen geeignet parametrisiert werden, um in einer CCAM DSP aufgelegt werden zu können. Diese sind in den folgenden Abschnitten im Detail dargestellt.

Die entwickelten Parametrisierungen erfüllen die an Informationsmodellierung gerichteten Anforderungen, siehe Abschnitt 3.2.3. Die Parametrisierungen wurden technisch umgesetzt und können aus Datenquellen gespeist werden. Entsprechende Backend-Module zur Informationsaufbereitung wurden entwickelt. Es konnten einige relevante Informationsgruppen verfügbar gemacht werden:

1. Straßenverkauf (Topografie) der A10, sowie der A9 und der A2 (ESRIUM Projekt, [11])
2. Verfügbare Fahrstreifen
  - a. Aus GIP-Daten, sowie
  - b. Content Streams der ASFINAG, in denen aktuelle Baustellen und Zwischenfälle kommuniziert werden.
3. Markante Punkte (Tunnelportale der beiden Tunnel in beiden Richtungsfahrbahnen)
4. Straßenoberbelag-Daten aus der aktuellen Messung des Roadstars (AIT-Fahrzeug als ASFINAG Dienstleister) auf der A2 und der A9 (Griffigkeit, Spurrinnen, Oberflächenschäden, Längsebenheit, Risse, Wasserfilmtiefe)

Für jede dieser Informationsgruppen wurde eine geeignete Parametrisierung entwickelt, die den Anforderungen an Informationsmodelle (siehe Tabelle 1) genügen. Backends wurden entwickelt, die die genannten Datenquellen automatisiert auslesen, die Information extrahieren und an den OPC UA Server schicken (UDP-Packages).

### *Demonstrator A10: lineare Referenzierung*

Um entlang einer Autobahn punktuelle und lineare Gültigkeitsbereiche von Regeln oder die Lage von Objekten zu beschreiben, eignet sich eine lineare Referenzierung. Die ASFINAG nutzt dazu die „Autobahnkilometrierung“, welche auch im GIP verwendet wird. Allerdings sind in der GIP mehrere Kilometrierungs-Arten definiert, die leicht unterschiedliche Latitude-Longitude-Koordinaten aufweisen. Zusätzlich unterscheidet sich die Kilometrierung der ASFINAG stellenweise von der der GIP. Auf- und Abfahrten sind nicht kilometriert. Die erwartete einfache Aufgabe der linearen Referenzierung stellt sich daher als nicht ganz so einfach dar. Im Rahmen des Projektes wurden die Probleme der ASFINAG transparent gemacht, es liegt allerdings nicht im Kompetenzbereich der ASFINAG die Differenzen zwischen interner und GIP-Kilometrierung zu beheben. Es war daher notwendig, einen praktischen Zugang zu entwickeln, der den Anforderungen des Demonstrators genügt.

In Absprache mit der ASFINAG wurde der Null-Kilometer auf den ersten Koordinatenpunkt des ersten GIP-Links der Richtungsfahrbahn gelegt. So konnte eine durchgehende Kilometrierung erstellt werden, die jedem Latitude-Longitude-Koordinatenpaar des GIP-Links eine Bogenlänge (Kilometrierung) zuordnet. Diese dient als Bezugssystem für die Lage von Punkten und die Beschreibung von linearen Gültigkeiten.

### *Demonstrator A10: Topografie*

Die Topografie der A10 (und der beiden Autobahnen A2 und A9, die im Lauf des Projektes hinzugefügt wurden) ist für jede Richtungsfahrbahn beschrieben durch jeweils eine Liste von Koordinaten-Tripel aus

- Latitude,
- Longitude und
- Kilometrierung (Bogenlänge)

Diese Parametrierung der Information erfüllt alle identifizierten Anforderungen.

### Demonstrator A10: Verfügbare Fahrstreifen und Backend Architektur

Die Codierung der Fahrstreifenverfügbarkeit wird angelehnt an Abbildung 16 umgesetzt. Für jeden Fahrstreifen wird mittels straßenspezifischer Distanzparametrierung eine Funktion *lane(s)* gebildet, die Stützstellen bei Änderungen der Verfügbarkeit des Streifens hat. Zur Bestimmung der verfügbaren Spuren wurden Daten aus zwei Datenquellen kombiniert und daraus die Information „Verfügbare Fahrstreifen“ generiert:

- (baulich) verfügbare Fahrstreifen, aus der GIP-Datenbank
- Aktuell gesperrte Fahrstreifen, aus den Content Streams der ASFINAG mit den Profilen PLANNED EVENTS und UNPLANNED EVENTS

Die Architektur des Backends (Datenquellen und Processing-Schritte) ist in Abbildung 17 dargestellt.

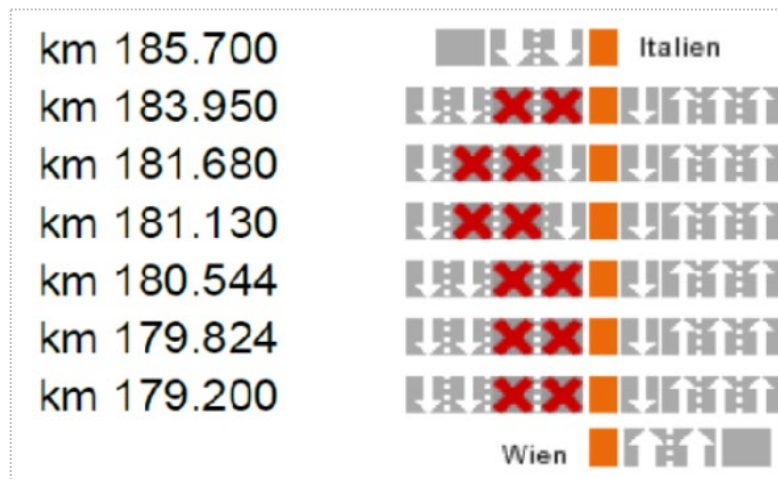


Abbildung 16 Fahrstreifencodierung gemäß Datex II (Quelle: AustrianPlannedEventsProfile)

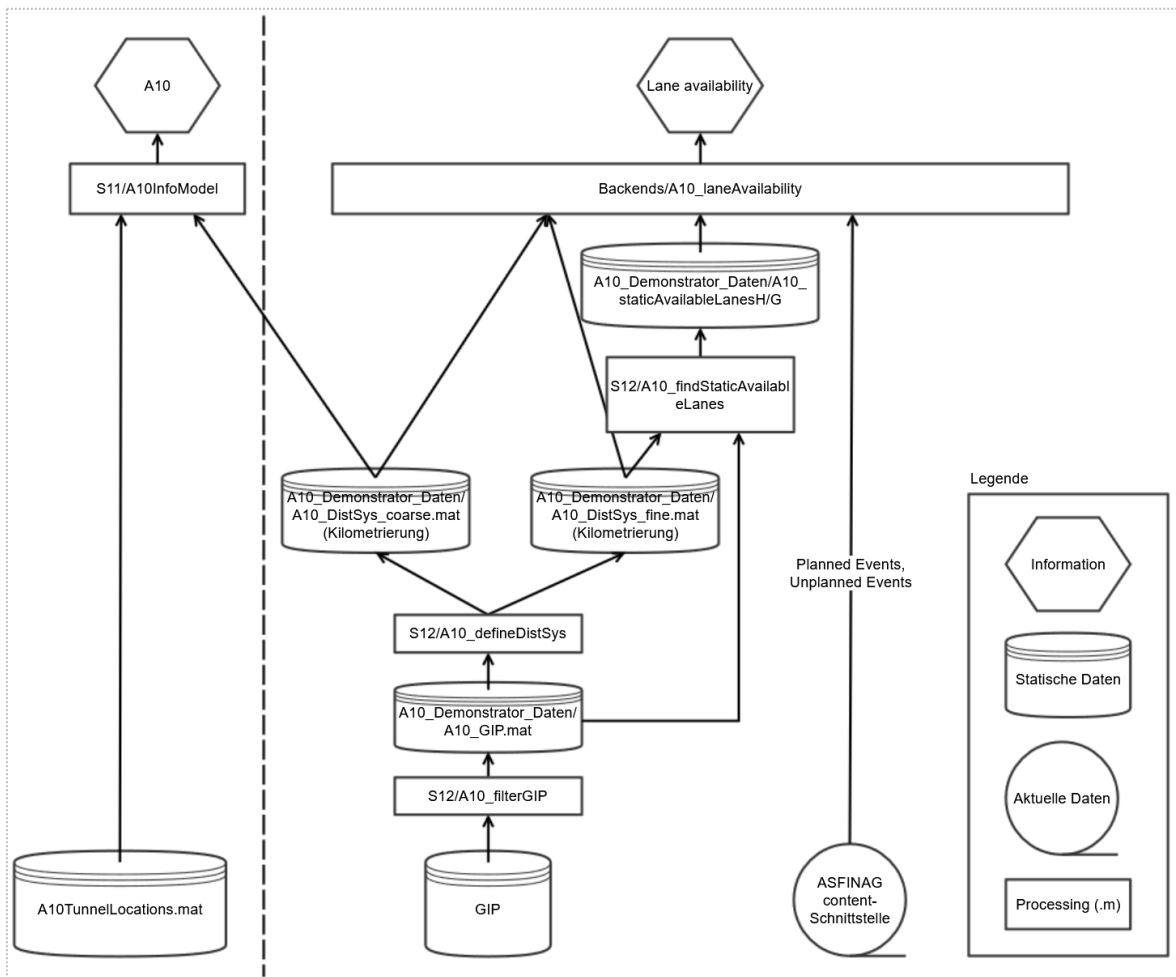


Abbildung 17 Backends „Lane Availability“ und Kilometrierung

### Demonstrator A10: markante Punkte

Für ein autonomes Fahrzeug hat diese Modellierung geringen Wert, dennoch bilden wir zumindest die für den Demonstrator relevanten Tunnelabschnitte in einer solchen Weise ab. Diese Knoten können auch mit den Livedaten verlinkt werden, z.B. Informationen, ob ein Tunnel aktuell in eine Richtung gesperrt ist. Für punktuelle Referenzierung und Ortsbezüge und Streckenabschnitte eignet sich die Kilometrierung der Autobahn. Diese ist sowohl für den Menschen gut interpretierbar als auch (mittels passender Hilfsfunktionen) von/nach Geo-Koordinaten oder z.B. GIP-Links umrechenbar.

**Tabelle 7 Markante Punkte im Bereich Demonstrator A10**

	<b>ArcLength km A10</b>	<b>Nord-Süd Lat</b>	<b>Nord-Süd Long</b>	<b>Süd-Nord Lat</b>	<b>Süd-Nord Long</b>
<b>geometryDirection</b>		true	true	false	false
<b>zero L/L</b>	0	47.779759	12.980351		
<b>Ofenauertunnel Portal in*</b>	30	47.576688	13.162968	47.566543	13.172043
<b>Ofenauertunnel Portal out*</b>	31.3	47.566290	13.171014	47.577467	13.164055
<b>Hieflertunnel Portal in*</b>	31.5	47.565033	13.171513	47.546978	13.174531
<b>Hieflertunnel Portal out*</b>	33.5	47.547024	13.174223	47.565033	13.172623

*Demonstrator A10 (A02 und A09): Straßenoberbelag-Daten*

Im Lauf des Projektes hat sich für die ASFINAG die Möglichkeit ergeben, verfügbare Daten aus dem Projekt ESRIUM [11] ebenfalls über eine CCAM DSP verfügbar zu machen. Das hier entwickelte Informationsmodell wurde für diese zusätzliche Aufgabe zwar erweitert, allerdings ist die Parametrierung der Information nicht ausgearbeitet. Das heißt, die Straßenoberbelag-Daten, wie sie im Projekt ESRIUM verfügbar sind, sind als Daten im CCAM DSP verfügbar (und nicht als Information) und verletzen daher die Anforderungen an die Parametrierung von Information. Da es sich also nicht um Informationsmodellierung im eigentlichen Sinn handelt, wird die Parametrierung der Daten übernommen:

- Griffigkeit
- Oberflächenschäden
- Risse
- Spurrinnen
- Wasserfilmtiefe

Darüber hinaus wurden die numerischen Werte nach Absprache mit der ASFINAG randomisiert, da es sich um potentiell sensible Daten handelt, die nicht auf einem (potentiell) öffentlich zugänglichen Server aufgelegt werden dürfen.

### *Demonstrator A10 Zusammenfassung*

Geeignete Datenquellen zur Extraktion der gewünschten Information wurden identifiziert und umfassend inhaltlich geprüft. Die Anbindung dieser Datenquellen in Backend-Modulen erfolgte in der Demophase. Bei der Analyse der verfügbaren Datenquellen wurde deutlich, dass nicht alle angestrebten Informationsgruppen bereitgestellt werden können, da teilweise keine entsprechenden Rohdaten erhoben werden, diese im Rahmen des Projektes nicht verfügbar oder nicht in ausreichender Qualität verfügbar waren. Im Verlauf der Demophase wurden insbesondere die Content Streams der ASFINAG analysiert. In engem Austausch mit der ASFINAG konnten Probleme in den Rohdaten, Inkonsistenzen zwischen zusammengehörigen Streams und Probleme der Parametrierung identifiziert werden. Diese Zusammenarbeit hat auch dazu geführt, dass der Demonstrator auf Bitte der ASFINAG um Inhalte aus dem [ESRIUM](#) Projekt [11] erweitert wurde.

Um diese Inhalte Benutzer\*innen des Digitalen Zwillings anschaulich verständlich zu machen, wurde ein geeignetes Frontend entwickelt. Da alle Informationsgruppen geografisch verortet sind, enthält das Frontend eine Karte und, über Menüs selektierbar, ausgewählte Informationen werden in diese Karte eingezeichnet. In Abbildung 18 ist das Informationsmodell sowie das Frontend für den Demonstrator „A10-Tunnelbaustelle“ abgebildet.

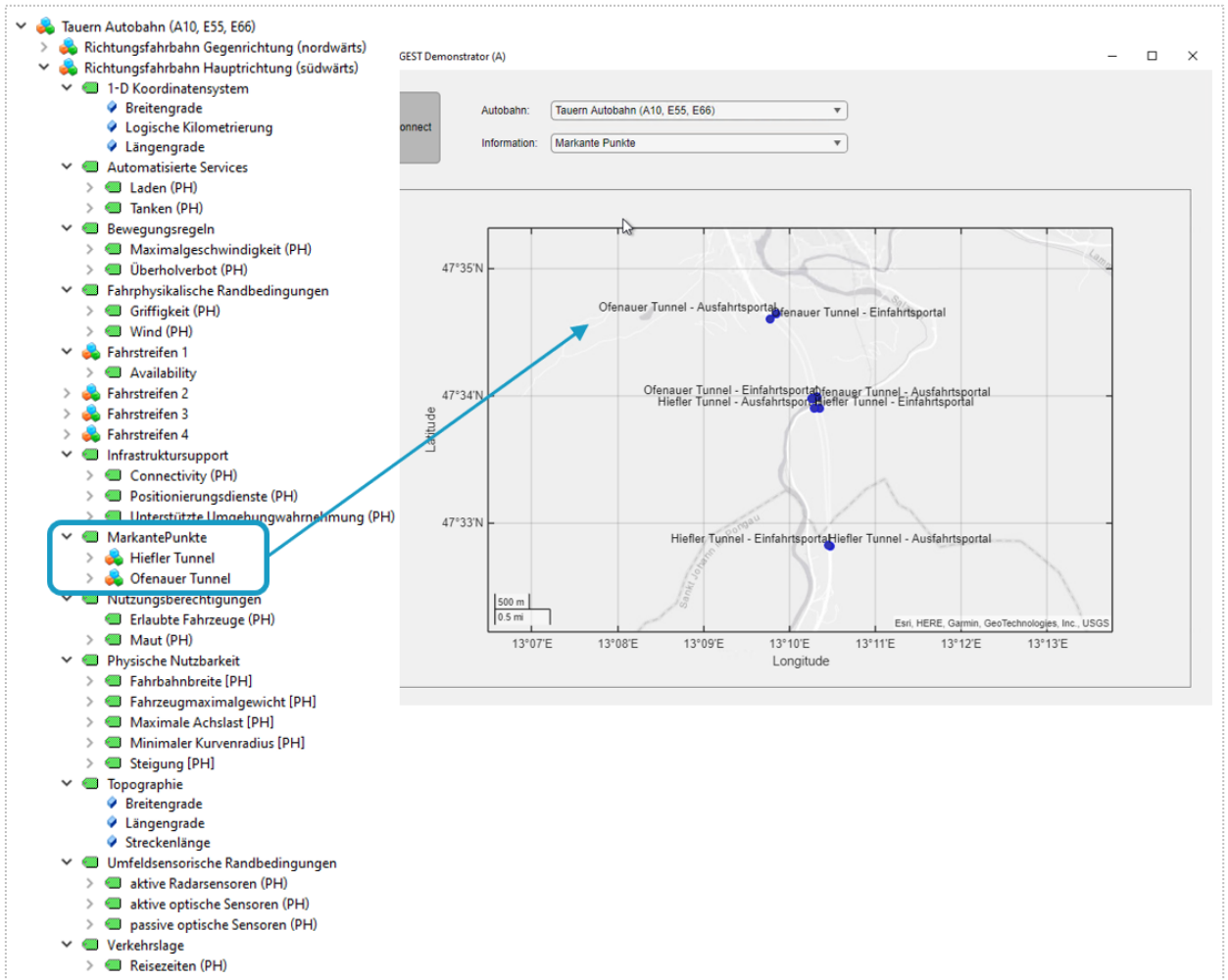


Abbildung 18 Informationsmodell für den Demonstrator „A10 - Tunnelbaustelle“ und Frontend. Markiert ist die aktuell abgebildete Informationsgruppe.

#### 3.4.4. Demonstrator A10 – Backend Architektur

Für den Demonstrator wurden zwei echte Backends entwickelt, die aus Content Streams der ASFINAG mit unterschiedlichen Profilen Daten einlesen und Information extrahieren. Zusätzlich wurde aus der GIP-Datenbank statische Information script-basiert extrahiert.

Der Aufbau der Backends ist nachfolgend in zwei Grafiken Abbildung 19 und Abbildung 20 dargestellt.

Das Backend „Lane Availability“, siehe Abbildung 19, errechnet die aktuell verfügbare Anzahl von Fahrstreifen auf der gesamten Autobahn. Abschnitte mit gleichbleibender



Anzahl verfügbarer Fahrstreifen werden zusammengefasst und jeweils nur die Kilometrierung, an der sich diese ändert, ist in der Parametrierung der Information relevant

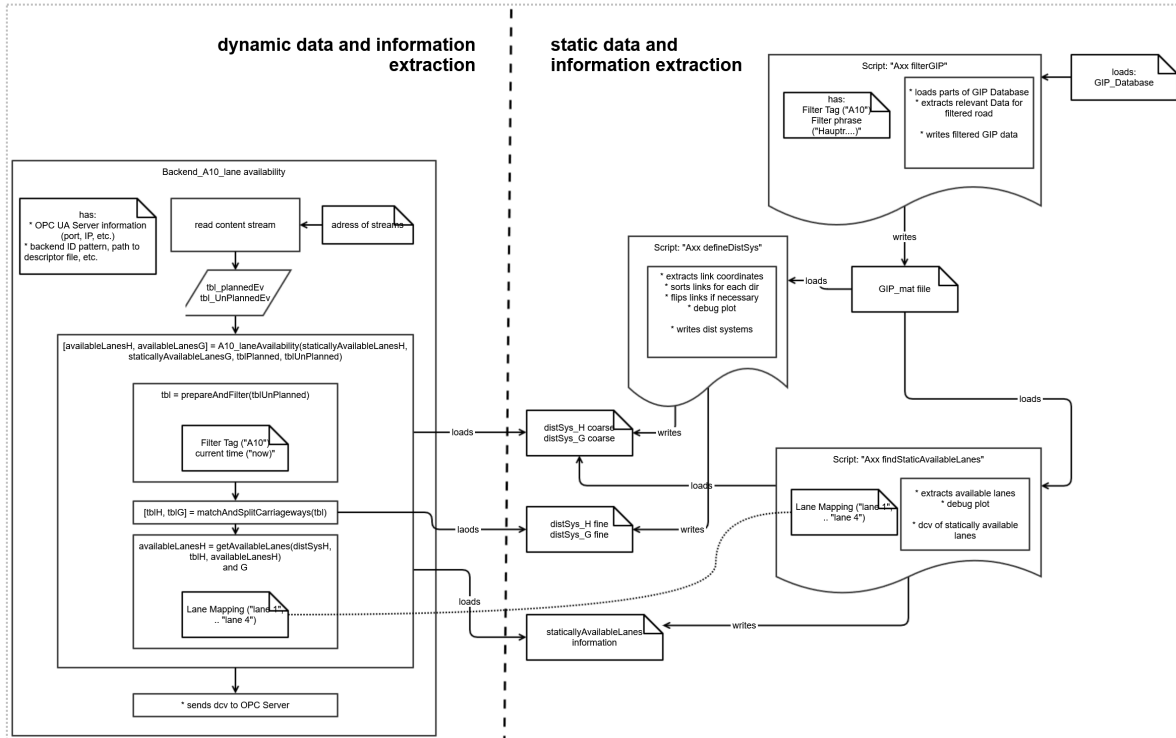


Abbildung 19 Aufbau des Backends „Lane Availability“

Das Backend „vMax“, siehe Abbildung 20, errechnet Autobahn-Abschnitte mit konstanter maximal erlaubter Geschwindigkeit. Hier zeigt sich, dass es bei der Parametrierung der Information derzeit unmöglich ist, die Anforderungen vollständig zu erfüllen: die Fahrzeugklassen sind nicht international homogenisiert, insbesondere sind die Ausnahmen des IGL nur für Österreich definiert und daher problematisch. Dennoch wurde eine, für die Zwecke des Demonstrators geeignete, Parametrierung gewählt, die explizit die drei auf der A10 in Österreich relevanten Fahrzeugklassen abbildet:

- LKWs > 7.5t höchstzulässiges Gesamtgewicht
- PKWs <= 3.5t höchstzulässiges Gesamtgewicht
- PKWs, die vom IGL ausgenommen sind

Da die Gültigkeiten zunächst in den Content Streams als Zusatztext codiert wurde, konnten diese Felder zwar ausgelesen werden, deren Inhalt war aber nur beschränkt automatisiert

verarbeitbar, weil die Zusatztextfelder Freitext enthalten und daher keine einheitliche Formatierung der Zeichen, Klassenbezeichnungen und Worte gegeben war.

Diese Probleme wurden mit den Kolleg\*innen der ASFINAG diskutiert. Nach Projektende konnte dieses Problem behoben werden. Dadurch hat sich allerdings die Codierung dieser Information im DATEX II Format verändert. Das Backend wurde nicht mehr angepasst. Es läuft aktuell, allerdings wird aufgrund der „nicht mehr befüllten Zusatztexte“ keine Fahrzeug-Zuordnung der Geschwindigkeitsbegrenzungs-Schilder mehr erfasst. Die ausgewiesenen Maximalgeschwindigkeiten stimmen daher nicht mehr (numerisch).

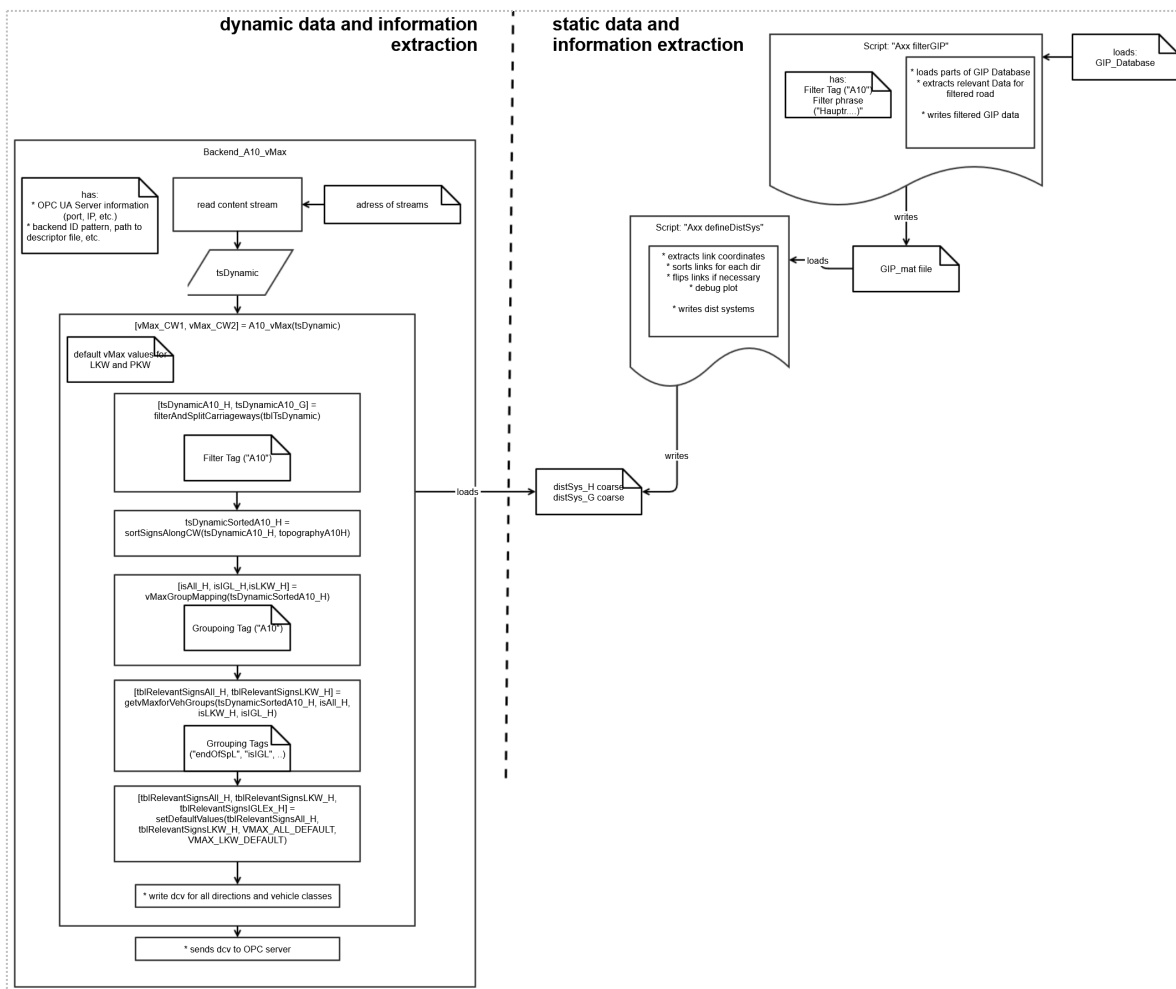


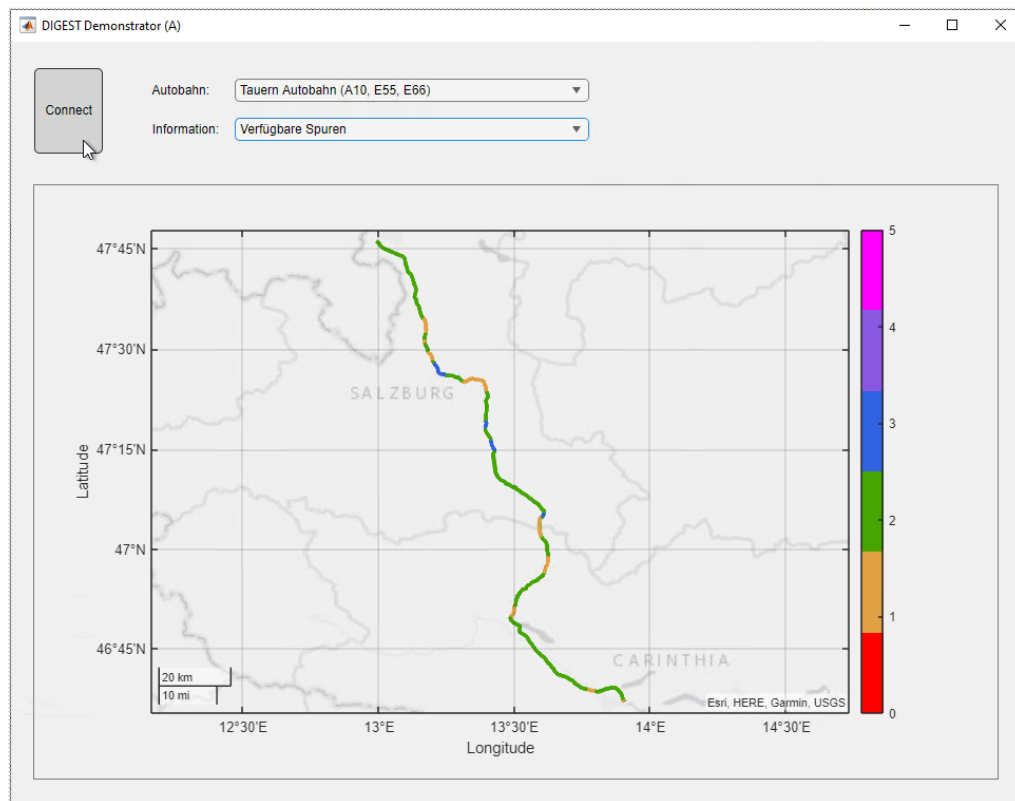
Abbildung 20 Aufbau des Backends „vMax“

### 3.4.5. Demonstrator A10 - Technische Umsetzung, Toolchain

Die Umsetzung dieses Demonstrators besteht architekturkonform aus einem Backend, das Daten aus GIP.at sowie DATEXII Streams fusioniert, um daraus ein Liveabbild der Fahrspurverfügbarkeit zu berechnen. Diese Funktionalität wurde in MATLAB umgesetzt versorgt den OPC UA Server zyklisch mit Livedaten. Das Informationsmodell des Servers wurde mit einer im Projektkontext entwickelten Toolchain erstellt, die auf MATLAB sowie dem frei verfügbaren Informationsmodell-Compiler der OPC Foundation basiert. Die Umsetzung des OPC UA Servers selbst nutzt die open-source Bibliothek „open62541“. Zur Visualisierung der Informationen wurde ebenso in MATLAB ein Frontend mit graphischer Darstellung auf Kartenbasis geschaffen.

#### *Technische Dokumentation für CCAM DSP User*

Hypothetischer User in des Demonstrators A10 ist ein hochautomatisiertes oder autonomes Fahrzeug, das z.B. über C-ITS relevante Informationen für die Durchquerung einer Tunnelbaustelle empfängt. In der Realität gibt es aktuell keine hinreichend automatisierten Fahrzeuge und ebenso noch keine hinreichend vollständig standardisierten C-ITS Messageformate, um die benötigte Information zum Fahrzeug zu übertragen. Um die Informationen für die Zwecke der Demonstration dennoch visualisieren und abrufen zu können, wurde im Projekt eine Frontend Applikation auf Basis MATLAB umgesetzt. Diese ist in Abbildung 21 dargestellt.



**Abbildung 21 Grafisches Frontend für den Demonstrator A10**

Nach Klick auf die Schaltfläche „Connect“ werden die vom OPC UA Server abgedeckten Autobahnen und die dort verfügbaren Informationen zur Auswahl angeboten. Die in Abschnitt 3.4.3 beschriebenen Informationsgruppen sind enthalten. Wir weisen darauf hin, dass die Informationen zum Straßenoberbelag nicht den tatsächlichen Messwerten entsprechen, sondern zum Schutz dieser vertraulichen Daten randomisiert werden. Bei einem Live-Update der Information im OPC UA Server wird die Frontenddarstellung automatisch aktualisiert.

Alternativ zu dieser grafischen Oberfläche für den A10 Demonstrator kann auch ein generischer OPC UA Client als Frontend eingesetzt werden. Dafür bietet sich z.B. UAExpert der Firma Unified Automation an, der nach Registrierung kostenlos heruntergeladen [17] werden kann. Abbildung 22 zeigt die Konfiguration des Demonstrator Servers (Die URL ist nur aus Deutschland, der Schweiz und Österreich erreichbar) sowie das Informationsmodell in der Darstellung durch UAExpert.

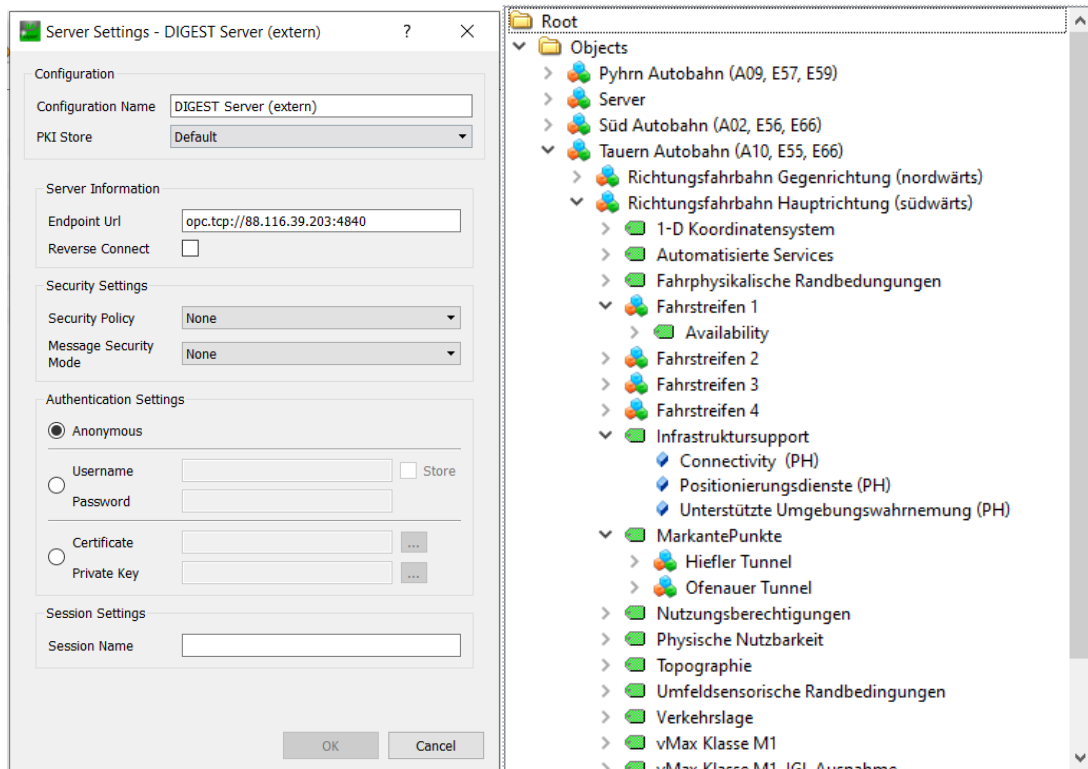


Abbildung 22 Verbindungskonfiguration und Informationsmodell des Demonstrators A10 in UAExpert

### Technische Dokumentation für CCAM DSP Operator

Der Betrieb des Demonstrators erfolgt durch ANDATA. In deren Räumlichkeiten steht der OPC UA Server, auf einer weiteren Maschine laufen die Backends, die viertelstündlich Informationen aus DATEX II Livestreams der ASFINAG sowie der Graphen-Integrations Plattform GIP generieren. Die Konfiguration der Firewall schließt eine Demilitarisierte Zone (DMZ) ein wie in Abbildung 23 dargestellt. Hier sind auch weitere Betriebsanforderungen dokumentiert, darunter CPU-Bedarf und Verfügbarkeit.

Der OPC UA Server ist öffentlich aus Deutschland, Österreich und der Schweiz erreichbar und kann unter der URL `opc.tcp://88.116.39.203:4840` mit beliebigen OPC UA Clients erreicht werden. Der Betrieb des Servers ist für mindestens 1 Jahr nach Projektende vorgesehen.

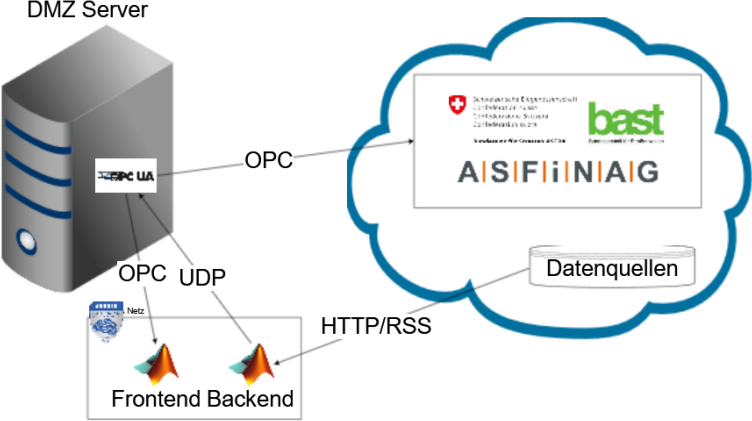
Funktionale Anforderungen	DIGEST (Change: OPC UA Server für Zugriff von außen betreiben)
Netzwerktechnische Sicht	 <p>The diagram illustrates the network architecture. On the left, a 'DMZ Server' is shown with an 'OPC UA' label. It is connected to a cloud representing the internal network. Inside the cloud, there is an 'OPC UA' component, a 'Datenquellen' (Data Sources) component, and a 'Frontend Backend' component. The 'Frontend Backend' is connected to the 'Datenquellen' via 'HTTP/RSS'. The 'DMZ Server' is also connected to the 'Frontend Backend' via 'OPC UDP'. The 'DMZ Server' is connected to the 'OPC UA' component in the cloud via 'OPC'.</p>
Verbindungsaufbau von außen (Internet)	✔️ aus A, D, CH
UDP Pakete von außen	(keine Anforderung)
Verbindungsaufbau nach außen (Internet)	(keine Anforderung)
OPC UA Server Update einspielen	✔️ (aus ANDATA Netz) → über RemoteDesktop lösbar
Verbindungstest / Inbetriebnahme (Wireshark)	(keine Anforderung)
Verfügbarkeit	90% Uptime für 1-2 Jahre. HW-Redundanz ist nicht erforderlich.
Rechenleistung / CPU Auslastung Server	Sehr gering Backend: Viertelständlicher Zyklus Frontend: punktuell
Betrieb, Überwachung, Fehlerfall	Überwachung via UAExpert manuell möglich Remote-Neustartmöglichkeit ist durch RemoteDesktop gegeben.

Abbildung 23 Betriebsrelevante Daten zum OPC UA Server

## Technische Dokumentation für Backend Developer

Für den Backend-Developer sind insbesondere zwei Arbeitsfelder für den Demonstrator relevant:

- Der Aufbau des Informationsmodells (im Idealfall aus standardisierten Blöcken/Modulen)
- Die Gestaltung der Kommunikations-Schnittstelle zwischen den Backends und dem OPC UA Server

Die Elemente des Informationsmodells sind für die hier entwickelten Demonstratoren noch nicht standardisiert. Die Umsetzungsentscheidungen wurden daher nach eigener Einschätzung bezüglich Sinnhaftigkeit, Notwendigkeit und Machbarkeit getroffen. Für diesen Demonstrator wurde das Informationsmodell über eine Toolchain in Matlab erstellt (siehe auch Abschnitt Technische Dokumentation für den CCAM DSP Manufacturer) den CCAM DSP Manufacturer betreffend). Das erlaubt die Nutzung von Scripts und die Nutzung der unterstützten Objekte in Matlab und erleichtert die Entwicklung des Informationsmodells. Die nachfolgende Tabelle 8 fasst die Felder des Informationsmodell-Structs zusammen.

**Tabelle 8 InfoModel Struct Felder**

Feldname	Beschreibung	Einschränkungen
.OPCLASS	Typ des Knotens	Verpflichtend, 'Object', 'Variable' oder 'Property'
.VALUE	(Start)wert eines Knotens	Optional, nur bei OPCLASS Property oder Variable erlaubt
.MAXLENGTH	Maximale Länge eines String-Werts	Optional, Ganzzahl, nur für Knoten mit VALUE-Typ char
.TYPEDEFINITION	Verweis auf einen OPC UA ObjectType, VariableType	Optional, char
.DESCRIPTION	Wird zum OPC UA DisplayName	Optional, char
.TOPLEVEL	Hängt den Knoten direkt unter dem Root-Element "Objects" ein	Optional, logical
.WRITEABLE	Knotenwerte sind via OPCUA writeValue schreibbar	Optional, logical
.LIVEDATAID	Ordnet den Knoten (bzw. seinen Wert) einem UDP Paket der Livedatenschnittstelle zu	Optional, char, maximal 19 Zeichen

Alle Knoten mit der gleichen LIVEDATAID werden in ein UDP-Paket zusammengefasst aktualisiert. Knoten mit Livedataid behalten den State BadWaitingForInitialData für ihre Werte, bis das erste Livedata-UDP-Paket empfangen (und dadurch der Wert aktualisiert) wurde.

In der InfoModel struct kann mit dem optionalen Feld LIVEDATAID ein Datum als "updatebar via UDP-Paket" deklarieren. Alle Daten mit derselben LIVEDATAID werden atomar mit einem UDP-Paket (und einem gemeinsamen Zeitstempel) aktualisiert.

- Der OPC UA Server akzeptiert UDP-Pakete auf Port 1982.
- Pakete dürfen max. 512 Byte groß werden (damit wird Paket-Fragmentierung vorgebeugt). Somit darf die Payload eines UDP-Pakets max. 478 Byte groß sein (512 - 20 (LIVEDATAID) - 14 (time stamp)).
- Das Format der UDP-Pakete ist (für jede LIVEDATAID) fix:
  - 20 Byte LIVEDATAID
  - 14 Byte Zeitstempel:
- Payload wie in LivedataDescriptor.csv beschrieben (es gilt die little endian byte order)
- Der Pfad zur Datei LivedataDescriptor.csv wird dem OPC UA Server als Startparameter übergeben.

Das Nodeset-File, welches das Informationsmodell beschreibt, liegt ebenfalls als Beilage „Informationsmodell Demonstratoren A2\_A9\_A10 NodeSet2“ bei. Als Anhang ist dieses File aus Gründen des großen Seitenumfanges nicht eingebettet.



Ein Beispiel für ein LivedataDescriptor.csv (Einträge müssen nach NodeID aufsteigend sortiert sein, ansonsten wird das LivedataDescriptor.csv beim Starten nicht eingelesen und Serverausführung wird beendet) ist folgendes Textstück:

```
%LIVEDATAID,NodeID,NodePath,DataType,nBytes
Backend1,4,exampleLiveData1_string,char,10
Backend1,5,exampleLiveData1_uint32,uint32,12
Backend2,7,exampleLiveData2_string,char,20
Backend2,8,exampleLiveData2_uint32,uint32,4
Backend1,29,exampleLiveData1_byte,int8,1
Backend1,30,exampleLiveData1_double,double,8
Backend1,31,exampleLiveData1_float,single,4
Backend2,32,exampleLiveData2_double,double,8
Backend2,33,exampleLiveData2_uint8,uint8,1
```

**Tabelle 9 Zeitstempel-Format**

Header Byte idx:	Inhalt	Anmerkung
21	milli-second low byte	timestamp millisecond als uint16
22	milli-second high byte	
23	second low byte	timestamp second als uint16
24	second high byte	
25	minute low byte	timestamp minute als uint16
26	minute high byte	
27	hour low byte	timestamp hour als uint16
28	hour high byte	
29	day low byte	timestamp day als uint16
30	day high byte	
31	month low byte	timestamp month als uint16
32	month high byte	
33	year low byte	timestamp year als uint16
34	year high byte	

### *Technische Dokumentation für den CCAM DSP Manufacturer*

Der CCAM DSP Manufacturer integriert die Backends in die CCAM DSP (hier: ein OPC UA Server) die er bereitstellt. Der OPC UA Server basiert auf open625415, einem Open-Source-Framework für die Erstellung von OPC-UA-Servern. Es wurde eine Toolchain, siehe Abbildung 24, entwickelt, die die Generierung von Informationsmodellen in Matlab® unterstützt und eine gültige Informationsmodelldatei für die Kompilierung erzeugt.



Abbildung 24 Toolchain zur Erstellung von Informationsmodellen und dessen Implementierung in einen OPC UA Server

Es sind zwei Backends implementiert, die Daten aus verschiedenen Quellen zusammenführen, Informationen extrahieren, und die Liveinformationen über ein eigens definiertes UDP-Paketformat an den OPC UA Server liefern.

Der dargestellte Ablauf ist durch MATLAB-basierte make Skripte automatisiert und führt den Erstellungsprozess des OPC UA Informationsmodells für die Integration mit dem open62541 Server-Framework aus, an dessen Ende ein Windows-Executable steht.

#### *Technische Dokumentation für den Frontend Developer*

Ein Frontend ist in Matlab® implementiert, welches Informationen vom OPC UA Server liest und ausgewählte Informationen in einem Dashboard visualisiert. In einer vollständigen Implementierung würde ein anderes Frontend die Informationen lesen, sie in C-ITS-Nachrichten umwandeln und zyklisch über Road-Side Units an den Benutzer, d. h. das automatisierte Fahrzeug (in der Demonstration weggelassen), senden. Das Informationsmodell des OPC UA Servers, das vom Frontend verstanden und gelesen werden muss, ist inhaltlich in Abschnitt 3.4.3 beschrieben und syntaktisch sowie semantisch durch das XML-Beschreibungsfile im NodeSet 2 Format (Beilage Informationsmodell Demonstratoren A2\_A9\_A10 NodeSet2) OPC UA-konform spezifiziert.

#### *Technische Dokumentation für Sensor/Infrastructure Operator*

Im Rahmen des Projektes wurden die Sensoren von Organisationen außerhalb des Konsortiums betrieben. Daher ist für die technische Dokumentation lediglich der publizierte Level of Service von Interesse und die Erreichbarkeit der Daten.

Für die Content Streams der ASFINAG [10] wurde durch die ASFINAG voller Zugang zu den Streams erteilt. Genutzt wurden im Demonstrator folgende Profile

- PLANNED EVENTS
- UNPLANNED EVENTS
- TRAFFIC SIGNS STATIC
- TRAFFIC SIGNS DYNAMIC

Die Datenquelle GIP [15] wurde als statische Datenquelle interpretiert. Es handelt sich dabei um Open Government Data, d.h. die Daten stehen jedem jederzeit zum Download zur Verfügung.

### 3.4.6. Demonstrator Testfeld Niedersachsen

Das DLR hat einen Demonstrator auf der Basis der im Projekt entwickelten Architektur für digitale Zwillinge prototypisch implementiert und evaluiert. Grundsätzlich werden in diesem Use-Case zwei Nutzer\*innenkreise betrachtet: autonome Fahrzeuge und Infrastrukturbetreiber. Es werden Inhalte aus dem Testfeld Niedersachsen, konkret Inhalte der Verkehrsmanagementzentrale (VMZ) in Niedersachsen, in dem digitalen Zwilling repräsentiert. Bei den im ersten Schritt von der VMZ empfangenen Inhalten handelt es sich um Daten im Sinne der DIKW-Pyramide, z.B. das Ergebnis einer Messung von Induktionsschleifen zur Ermittlung von passierten Fahrzeugen in einem bestimmten Zeitintervall. Gemäß dem entwickelten Konzept sollten innerhalb des digitalen Zwillings Inhalte auf Informationsebene abgelegt werden. Somit ist eine Transformation der Inhalte notwendig. Diese Transformation und das Resultat, die Information, ist abhängig vom Nutzer\*innenkreis der Inhalte. So ist z.B. für ein autonomes Fahrzeug die Information relevant wie die Auslastung der Spuren / Straßen entlang der Strecke ist wohin gehend für einen Infrastrukturbetreiber Informationen wie Anzahl der Messungen in der letzten Stunde, Zeitpunkt der letzten Messung und technische Ausfälle relevante Informationen sind. Beide Perspektiven können aus den Inhalten des Testfeld Niedersachsen extrahiert werden. Von der VMZ werden im Rahmen des Testfeld Niedersachsens drei verschiedene Inhaltstypen zur Verfügung gestellt: Messungen von Induktionsschleifen, Messungen von Wetterstationen und angezeigte Inhalte von Wechselverkehrszeichen.

Im Rahmen des Projektes wurde ein Demonstrator auf der Basis der im Projekt entwickelten Architektur für digitale Zwillinge prototypisch für Teile des Testfeld Niedersachsens implementiert und evaluiert. Abbildung 25 stellt dabei das Rollenmodell der einzelnen Stakeholder im Allgemeinen dar. Die blau eingekreisten Nummern stellen jeweils die inhaltlichen Schwerpunkte dieses Abschnitts der Dokumentation dar. So geht z.B. Unterkapitel eins auf die Datengrundlage des Demonstrators von der Verkehrsmanagementzentrale (VMZ) in Niedersachsen ein. Analog dazu gehen die

folgenden Kapitel auf die jeweiligen Bestandteile im Bild ein und erläutern diese im Detail aus technischer Sicht.

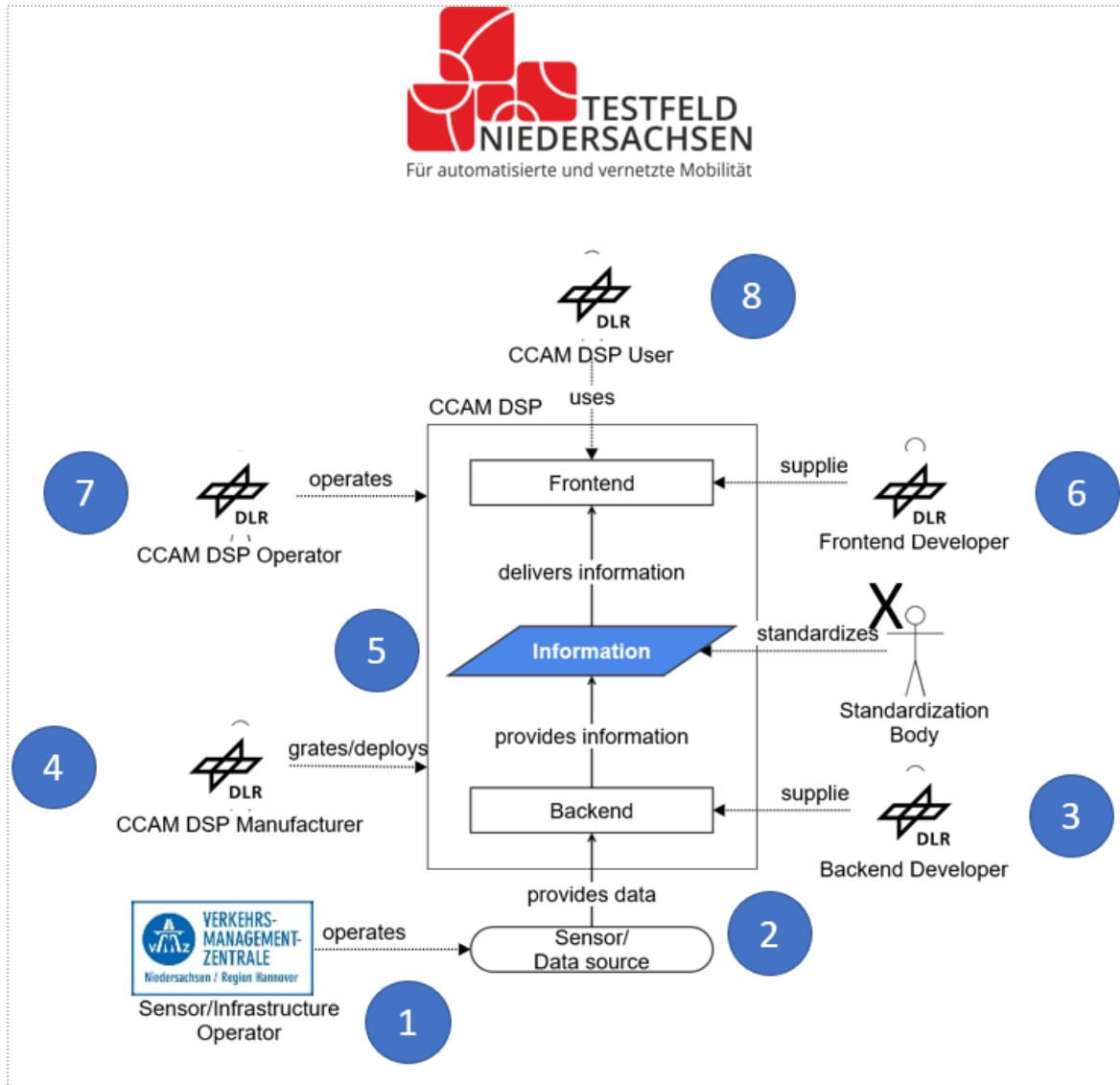


Abbildung 25 Rollenverteilung für den Testfeld Niedersachsen Demonstrator. Zahlen entsprechen Kapitelnummern in diesem Unterkapitel.

Weiterführende Informationen sind zudem im Anhang „Demonstrator Testfeld Niedersachsen Technische Dokumentation“ zu finden

(1) Datengrundlage / Input für den Demonstrator (keine Entwicklung im Rahmen von DIGEST)

Als Datengrundlage bzw. Datenbeispiele wurden Daten aus der VMZ in Niedersachsen ausgewählt. Bei den Daten handelt es sich zum einen um Daten von physischen Sensoren

in Niedersachsen und zum anderen „Aktoren“(Wechselverkehrszeichen). Dabei werden die folgenden drei Datenkategorien betrachtet:

1. Messquerschnitte (MQ): Messquerschnitte liefern Daten über Anzahl gemessener Fahrzeuge in einer Zeiteinheit, deren Kategorie (PKW, LKW) und ihre Geschwindigkeit
2. Glättemeldeanlagen (GMA): Glättemeldeanlagen liefern Daten über die Straßenbeschaffenheiten wie Oberflächentemperatur, Niederschlag o.ä.
3. Anzeigequerschnitte (AQ): Anzeigequerschnitte zeigen wechselnde Verkehrszeichen z.B. auf Autobahnen an. Das aktuell angezeigte Verkehrsschild, Position und Anzeigeposition auf dem Anzeigequerschnitt, wird übermittelt.

Die Datengrundlage (also Sensoren und Aktoren) werden von der VMZ in Niedersachsen betrieben. Die gesamten Daten aller Bestandteile werden in der VMZ in Hannover fusioniert. Zu dieser zentralen Fusionsstelle besteht seitens des DLR's eine Verbindung, welche über Updates der einzelnen Daten informiert. Der Austausch für alle Datenkategorien läuft im JSON Format [5]. Der Inhalt basiert dabei auf Standards der Nutzer\*innen der einheitlichen Rechnerzentralensoftware für Verkehrsrechnerzentralen - NERZ e.V. [18]. Diese Updates werden in regelmäßigen Zyklen an einen Webserver des DLR's übermittelt (Updateraten: MQ: 1/min, GMA: 1/min, AQ: on-demand / wenn sich das anzuzeigende Schild ändert). Eine detaillierte Darstellung der Positionen und Infrastrukturen sind im Anhang "Demonstrator Testfeld Niedersachsen Technische Dokumentation" angefügt.

#### *(2) DLR interne Datenbereitstellung (keine Entwicklung im Rahmen von DIGEST)*

Sofern Updates vom zentralen Server der VMZ beim Web Server im DLR angekommen sind, werden die Nachrichten über einen Message Broker, hier konkret Apache Kafka [4], verteilt. Dabei werden die ankommenden Daten je nach Datenquelle (MQ, GMA, AQ) in verschiedene Topics des Message Brokers geschrieben. Es geschieht hierbei keine Abwandlung der Daten lediglich ein Weiterverteilen. Das Nachrichtenformat bleibt gleich: JSON mit NERZ-Inhalten.

### (3) DIGEST – DLR-Demonstrator Backend

Bei dieser Komponente / Bestandteil handelt es sich um den zentralen Dienst, welcher Daten entgegennimmt und eine Umwandlung in Informationen vornimmt. Dabei ist es wichtig zu wissen, dass nach dem DIGEST-Konzept im Digitalen Zwilling (DZ) Informationen und keine Daten oder Handlungen vorliegen und somit ein Informationsmodell vorhanden ist. Eine detaillierte Erklärung und Erläuterung dieser Argumentation und Modellierung von Informationen befindet sich in dem Projekt-Papier „UNPUBLISHED: IEEE-Paper „Infrastructure-based digital twins for cooperative, connected, automated driving and smart road services“. Somit erfüllt diese Komponente die Aufgabe Daten (welche von der VMZ im NERZ-Format kommen) in Informationen umzuwandeln und im DZ zu speichern. Wie diese Umwandlung im Detail aussieht, wird ebenfalls in dem Projekt-Papier („UNPUBLISHED: IEEE-Paper „Infrastructure-based digital twins for cooperative, connected, automated driving and smart road services“) beschrieben. Um dies kurz zu rekapitulieren ist die Aufgabe hier kurz beispielhaft für die Anzeigequerschnitte zusammengefasst:

Eingabe Daten Beispiel (abgewandelt zur besseren Darstellbarkeit und Lesbarkeit):

```
{„Zeitpunkt“: „...“, „Position“: {„x“: 1, „y“: 2}, „gemessene PKWs in Fzg/min“: 20}
```

Diese Beispieldaten beschreiben zu einem bestimmten Zeitpunkt und Ort (2D Punkt) eine Messung und somit Daten. Diese Daten weisen noch eine gewisse Missinterpretationsfähigkeit da z.B. die Koordinatensysteme nicht klar sind oder noch offen ist auf welche Fahrspur, Richtung und auch Strecke sich die Messung bezieht. Um dies eindeutig einem automatisierten Fahrzeug mitzuteilen, sollte in einem DZ die Information stehen, welche z.B. eindeutig ist (weitere Anforderungen werden im Projekt-Papier „UNPUBLISHED: IEEE-Paper „Infrastructure-based digital twins for cooperative, connected, automated driving and smart road services“ dargestellt). Außerdem ist noch zu erwähnen, dass die Information in einer Beschreibung vorliegen sollte, die für den Empfänger geeignet ist. Hier stellt ein höher automatisiertes Fahrzeug das Ziel der Information im DZ dar. Somit ist für das Fahrzeug z.B. relevant, welche Verkehrsstärke auf seiner Strecke vorliegt. Somit müssen die Messwerte in Streckenkoordinatensysteme gewandelt werden. Im Rahmen des Projekts wurden Beispiel-Repräsentationen für das Streckenkoordinatensystem basierend auf Listen gewählt:



- Streckenkilometer {Autobahn: A2, Fahrspur: Hauptfahrstreifen}: [0, 5, 8, 20]
- Verkehrsstärke {Autobahn: A2, Fahrspur: Hauptfahrstreifen}: [2300, 1500, 3770, 2100]

Diese beiden Listen liegen im Informationsmodell des DZ und werden vom Backend befüllt. Das Tupel aus diesen beiden Listen stellt die Informationen für eine Fahrspur auf der Autobahn 2 dar. In der ersten Liste werden die Streckenkilometer der Messung gespeichert. Dazu werden die Geo-Punkte aus dem rohen JSON auf des Streckenkoordinatensystem projiziert und gespeichert. In der zweiten Liste werden die Messwerte (in Fzg/h) gespeichert, diese werden aus den Rohdaten übernommen. Dabei ist das Tupel aus beiden Listen wie folgt zu lesen: bei Streckenkilometer 0 besteht eine Verkehrsstärke von 2300 Fzg/h. Analog die anderen Werte aus den beiden Listen. Diese Darstellung wurde gewählt, da somit auch einer Interpolation aus Sicht des Fahrzeuges einfach möglich ist. So kann z.B. einfach berechnet werden das zwischen km 0 und km 5 der Verkehrsfluss abnimmt. Über z.B. Annahmen über Abfluss können dann einfach Zwischenpunkte berechnet werden. Ziel dieser Überlegung ist es, darzustellen, dass die reine Datendarstellung (JSON) für einen gewissen Anwenderbereich womöglich nicht die Beste ist. Die hier gewählte Darstellung hat nicht den Anspruch die optimale Repräsentation zu sein, jedoch illustriert sie das vorgestellte Konzept in DIGEST. Die bisherige Darstellung beschreibt auf semantischer Ebene was passiert, die Aufgabe und die Intention hinter der Implementierung ist. Weitere Details dazu sind wie bereits erwähnt im Projekt-Papier („UNPUBLISHED: IEEE-Paper „Infrastructure-based digital twins for cooperative, connected, automated driving and smart road services“) zu finden. Ein weiterer Aspekt in der Implementierung ist, dass im Informationsmodell außerdem noch die Informationen für Betreiber, der aufbereitet werden. So ist für das autonome Fahrzeug der Wert der Verkehrsstärke im Streckenkoordinatensystem relevant, für den Betreiber jedoch z.B. Fehlerzustände, das letzte Update und die 2D Position der Infrastruktur. Dazu werden im Informationsmodell beide Perspektiven in unterschiedlichen Bereichen dargestellt (die folgenden Kapitel erläutern dies genauer). Im Folgenden wird die Backend-Implementierung in Form von verwendeten Frameworks und kurzen Beispielen erläutert.

### *Technische Implementierung von (3)*

Die Implementierung ist vollständig in Python (Version 3) geschrieben. Für den Demonstrator wird sich auf eine Strecke der A2 rund um Braunschweig fokussiert. Als

erstes werden Nachrichten vom DLR Kafka Message Broker abgeholt dazu wird das „kafka-python“ Paket verwendet. Zunächst muss eine Karte geladen werden, welche dazu benutzt wird, die 2D-Koordinaten aus den Inputs in das Straßenkoordinatensystem / Straßenkilometer umwandelt. Für die Projektionen wird die Bibliothek „pygeos“ in Verbindung mit „geopandas“ verwendet. Wenn nun eine neue Nachricht ankommt, wird zunächst geprüft, ob sich die Messung im Bereich des Demonstrators bewegt, wenn dies der Fall ist, wird die Messung auf den relevanten Fahrsteifen und Richtung projiziert. Dementsprechend werden der Streckenkilometer und Messwert in jeweils einer Liste gespeichert. Wenn dies geschehen ist, wird die komplette Liste im OPC-UA Server aktualisiert. Dazu wird die Bibliothek „asyncua“ verwendet. Somit ist die Aufgabe des Backends erledigt und der Vorgang wird für alle neu ankommenden Nachrichten durchgeführt.

#### *(4) Backend Deployment*

Das Backend läuft auf einer virtuellen Linux Maschine (Ubuntu 20.04.4 LTS) im Backend des DLR-Instituts für Verkehrssystemtechnik [3]. Ebenso wie alle anderen Komponenten (außer die Webseiten Darstellung des Frontends, welche im Webbrowser des Clients läuft). Die virtuelle Maschine besitzt 2 CPU-Kerne (Intel(R) Xeon(R) Gold 6126 CPU @ 2.60GHz) und 8Gb RAM. Das Backend läuft als Hintergrundprogramm auf dieser Maschine im Dauerlauf. Eine Verbindung zum OPC-UA Server erfolgt über: „opc.tcp://admin@localhost:4840/digest/vmz/“.

#### *(5) Digitaler Zwilling – OPC UA Server*

Die zentrale Komponente, welche die Informationen enthält, die für die Clients bereitgestellt werden sollen, ist der OPC UA Server. Der Server ist ebenfalls in Python programmiert, dafür wurde ebenfalls die Bibliothek „asyncua“ verwendet. Vergleichsweise ist der Server hingegen mit wenig Implementierungsaufwand aber viel Modellierungsaufwand verbunden. Hierbei ist es „lediglich“ notwendig das Informationsmodell dem Server zur Verfügung zu stellen und anschließend den Server zu starten. Zum Aufbau des Informationsmodell werden zwei Schritte herangezogen. Wie zuvor erläutert gibt es zwei Bereiche im Informationsmodell, welche unterschiedliche Sichtweisen betrachten: autonomes Fahrzeug und Infrastrukturbetreiber als Zielgruppe. Zunächst werden in einem manuellen Prozess mit der Open-Source Software: „FreeOpcUa – OPCUA-Modeler“ [9] die grundlegenden Objekttypen (z.B. Listen-Tupels) angelegt. Dies ist in Abbildung 26 dargestellt. Im zweiten

Schritt werden programmatisch einzelne Knoten im Informationsmodell mit den manuell erstellten Objekttypen instanziiert:

```
nodes.extend(await instantiate(folder_to_insert_mq_veh_per,  
    abstract_mq_type_veh_per, bname=f'{objname}-vKfz',  
    dname=ua.LocalizedText(f'{objname}-vKfz'), idx=idx))
```

Für die Sicht der autonomen Fahrzeuge werden jeweils für jede Fahrtrichtung 6 Listen-Tupels angelegt: Geschwindigkeit und Anzahl für jeweils KFZ, PKW und LKW. Für die Infrastruktursicht werden statisch aus einer CSV-Datei die Standorte der einzelnen Verkehrsinfrastrukturanlagen herausgelesen und für jede Infrastruktur ein Knoten angelegt, welcher eine initiale Positionierung erhält. Analog werden für die anderen Datentypen auch Knoten im Informationsmodell angelegt. Nachdem dieser Initialisierungsprozess abgeschlossen ist und somit das Informationsmodell vollständig ist, wird der Server nun gestartet. Der Server wird lokal auf der gleichen Maschine, wie in Abschnitt (4) Backend Deployment erläutert, unter „opc.tcp://0.0.0.0:4840/digest/vmz/“ deployed. Nun können sich Clients, wie z.B. das zuvor beschriebene Backend oder noch folgende Frontend, mit dem Server verbinden und Informationen in das Informationsmodell schreiben oder lesen. Ein Auszug aus dem Datenmodell für die VMZ ist in der Anlage "Demonstrator Testfeld Niedersachsen Informationsmodell VMZ Nodeset2" enthalten.

The screenshot shows the FreeOPCUa Modeler interface with the following components:

- Node Sets:** A table listing namespace information.
 

Browse Name	Index	Value
NamespaceArray	0	http://opcfoundation.org/UA/
	1	http://freeopcua/defaults/modeler
	2	http://digest/vmz
- Attributes Editor:** A table showing attributes for a selected node.
 

Attribute	Value	Data Type
BrowseName	2:MQVehiclePerspecti	QualifiedName
Description	LocalizedText(Locale=	LocalizedText
DisplayName	LocalizedText(Locale=	LocalizedText
EventNotifier		Byte
NodeClass	Object	Int32
NodeId	ns=2;i=2167	NodeId
UserWriteMask		UInt32
WriteMask		UInt32
- References Editor:** A table showing a reference definition.
 

ReferenceType	NodeId	BrowseName	TypeDe
1 HasTypeDefinition	i=61: ...	0:FolderType	Null
- Model Tree:** A hierarchical tree view of the model structure.
 

DisplayName	BrowseName	NodeId
VendorServerInfoType	0:VendorS...	i=2033
WriterGroupMessageType	0:WriterGr...	i=17998
WriterGroupTransportType	0:WriterGr...	i=17997
VMZ	2:VMZ	ns=2;i=2010
AQ	2:AQ	ns=2;i=2126
GMA	2:GMA	ns=2;i=2127
MQ	2:MQ	ns=2;i=2003
SystemObjekt	2:System...	ns=2;i=2066
VMZVehiclePersp	2:VMZVe...	ns=2;i=2157
MQ	2:MQ	ns=2;i=2158
TrackContent	2:TrackC...	ns=2;i=2159
TrackContentReduced	2:TrackC...	ns=2;i=2168
- Log Console:** Shows server startup logs for uamodeler, python-opcua, and asyncua.

Abbildung 26 OPCUA Modeler: Beispieldarstellung der manuell angelegten Objekttypen

## (6) Frontend – OPC UA Client

„Das“ Frontend ist ebenfalls in Python geschrieben. Die Anführungszeichen sollen verdeutlichen, dass es nicht ein einziges Frontend gibt, sondern jeweils ein Frontend für MQ, GMA, AQ-Messungen gibt. Jedes Frontend lässt sich dabei zwischen der Perspektive des autonomen Fahrzeugs und des Infrastrukturbetreibers umschalten. Für die Verbindung zum OPC UA Server wird ebenfalls wieder die Bibliothek „asyncua“ verwendet. Dabei werden die zuvor erstellten Knoten im Informationsmodell gesucht und anschließend über einen OPC UA Mechanismus auf Änderungen subscribed. Abbildung 27 stellt einen kleinen Auszug als Beispiel zum subscriben zur Verfügung. Eine detaillierte Anleitung findet sich in der Dokumentation des verwendeten Frameworks „asyncua“ [21].

```
subscriptions = []
for folder in await vmz_folder.get_children():
    folder_name = await folder.read_browse_name()
    if folder_name.Name == 'MQVehiclePerspective':
        for vmz_object in await folder.get_children():
            name_obj = (await vmz_object.read_browse_name()).Name
            content[name_obj] = TrackContent(name_obj)
            for attribute in await vmz_object.get_children():
                name = (await attribute.read_browse_name()).Name
                subscriptions.append(
                    sub.subscribe_data_change(attribute))
                id_map[attribute.nodeid] = f'{name_obj}-{name}'
                logging.debug(f'Subscribe to {name_obj}-{name}')
await asyncio.gather(*subscriptions)
await sub.subscribe_events()
```

Abbildung 27 Sample Code um auf Änderungen im OPC UA Server zu subscriben. vmz\_folder gibt dabei den Elternknoten im Informationsmodell an.

Als Basis für die Visualisierung dient die Python Bibliothek „plotly“ mit der Erweiterung: „dash“. Plotly ist ein Plotting Framework für Python mit dem u. a. Daten auf Karten visualisiert werden können. Die Erweiterung Dash ermöglicht es interaktive Webapplikationen zu entwerfen, welche auch Änderungen des Benutzers in die Darstellung erlauben. Eine Limitierung der hier gewählten Frameworks ist, dass dieser Demonstrator nur von einem Client gleichzeitig genutzt werden kann. Wenn mehrere Clients über ihren Webbrowser auf die Applikation zugreifen, werden Änderungen über die Clients hinweg propagiert und die Darstellung ändert sich bei allen anderen. Es sind auch noch weitere

Probleme bei einer permanenten Nutzung zu erwarten, da die hier gewählte Form der Implementierung lediglich ein Demonstrator ist, welcher darstellen soll, dass das DIGEST Konzept funktioniert. Die Software ist weder ausgiebig getestet noch für einen stabilen Langzeitgebrauch gedacht.

Durch den in Abbildung 27 gezeigten Code werden nun im Frontend (hier ist das Frontend im Sinne von DIGEST gemeint und nicht das Webfrontend, welches in einem Webbrowser läuft) Updates der VMZ (konkret MQ-Informationen aus der Fahrzeugperspektive) empfangen. Nun wird im Frontend nochmal eine Interpolation der Informationen, zur intuitiven Darstellung, der Listen-Tupels vorgenommen. Die zuvor angesprochene einfache Interpolation wird hier linear durchgeführt. Die interpolierten Daten werden nun auf einer Karte in Form einer „plotly.graph\_objects.Densitymapbox“ dargestellt. Nun kann ein Webbrowser auf diese Karte zugreifen und die Informationen angezeigt werden. Wie auch zuvor wird das Vorgehen für die MQ-Informationen skizziert. Die anderen Quellen (GMA und AQ) sind analog implementiert. Abbildung 28 und Abbildung 29 stellen dabei die Visualisierung des Frontends dar. Zum technischen Hintergrund: in Python wurde eine Applikation geschrieben, welche auf Basis von Plotly und Dash einen Webserver bereitstellt. Ein Webbrowser kann nun auf diesen Webserver zugreifen und diese Anzeige ist in den Abbildungen dargestellt. Lediglich das Python Programm (mit dem Webserver) stellt das Frontend im engeren Sinne des DIGEST Konzepts dar.

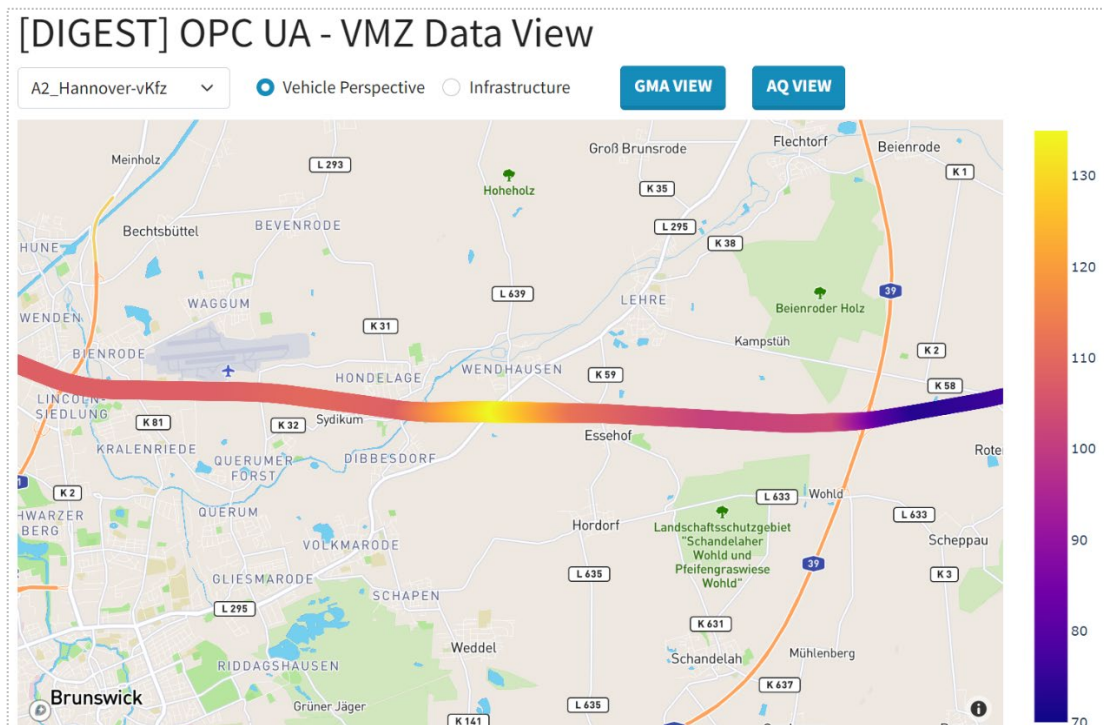


Abbildung 28 Visualisierung der Informationen durch das Frontend. In der Darstellung wird die Geschwindigkeit der Fahrzeuge in Fahrtrichtung Hannover dargestellt. Die Darstellung ist aus der Fahrzeugperspektive.

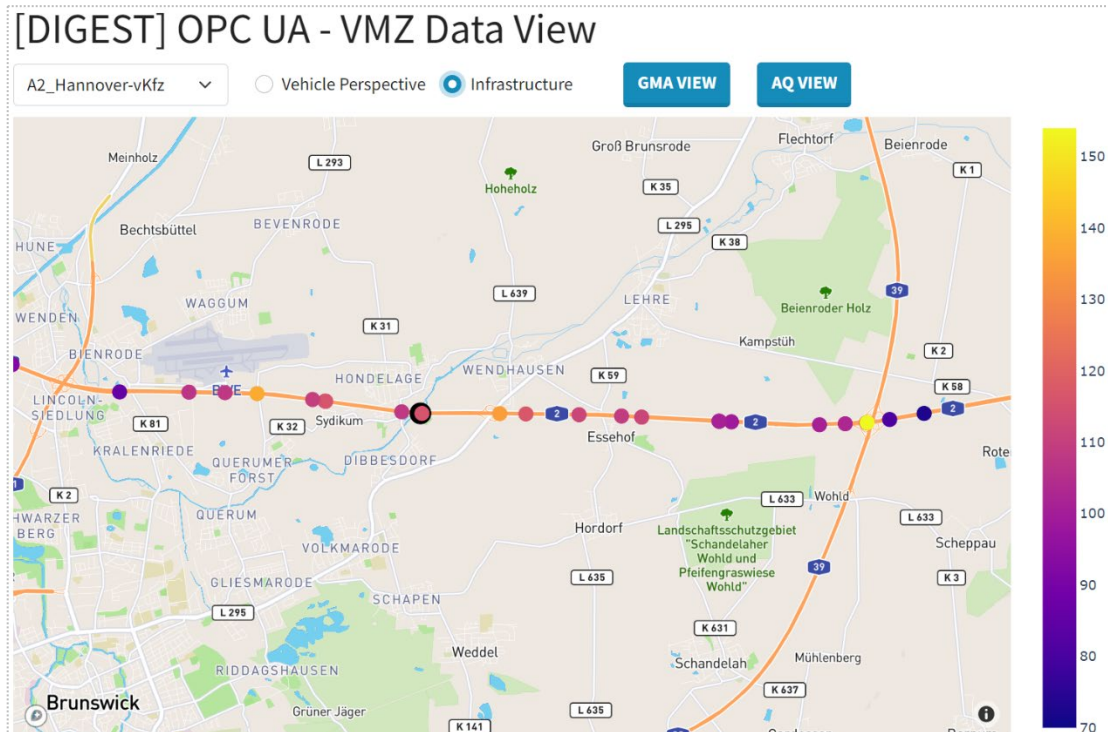


Abbildung 29 Visualisierung der Informationen durch das Frontend. In der Darstellung wird die Geschwindigkeit der Fahrzeuge in Fahrtrichtung Hannover dargestellt. Die Darstellung ist aus der Infrastrukturperspektive. Hier wird die relevante Information durch eine schwarze Markierung dargestellt: keine Daten verfügbar.

### *(7) Frontend Deployment*

Das Frontend (Python Programm mit Webserver) läuft ebenfalls auf der gleichen virtuellen Maschine wie in Abschnitt (4) Backend Deployment dargestellt. Die Verbindung zum OPC UA Server wird über „opc.tcp://admin@localhost:4840/digest/vmz/“ hergestellt. Nach außen hin läuft der Webserver des Frontends auf dem TCP-Port 8050 für die Darstellung der MQs, 8052 für die GMAs und 8053 für die AQs. Für den einfachen Zugriff werden die Webserver durch einen davor geschalteten Nginx [2] Reverse-Proxy gekapselt. Dabei ist ein Zugriff über die gleiche Hostadresse möglich, jedoch wird über Pfade das Ziel festgestellt. Für das DLR interne Deployment hier das Beispiel:

- <http://ts-bsvuvvdigest.intra.dlr.de/> → Visualisierung der MQs
- <http://ts-bsvuvvdigest.intra.dlr.de/gma/> → Visualisierung der GMAs
- <http://ts-bsvuvvdigest.intra.dlr.de/aq/> → Visualisierung der AQs

Für diese URL's sind Weiterleitungen aus externen Netzwerken eingerichtet. Der Zugriff ist in Kapitel Demonstrator Testfeld Niedersachsen beschrieben.

### *(8) Frontend User / Access*

Wie bereits im Abschnitt zuvor dargestellt können Nutzer\*innen auf die Visualisierung des Frontends zugreifen. Dies geschieht über einen Webbrowser. Ein direkter Zugriff auf den OPC UA Server ist z.B. auch über einen generischen Client möglich. Im Rahmen des Projekts wurde seitens des DLR die FreeOpcUA Client GUI [9] verwendet. Der technische Zugriff auf den DLR-Demonstrator (Web/http und OPC UA basiert) ist nur aus DLR-Netzen möglich. Ein Zugriff auf die Webseiten Darstellung des Demonstrators ist wie zuvor erwähnt eingerichtet und in Kapitel Demonstrator Testfeld Niedersachsen beschrieben.

#### 3.4.7. Übergaben

##### *Demonstrator A10*

Die Inhalte des Demonstrator A10 können jederzeit über das generische Frontend „UA Expert“ (Installation und Einstellungen siehe Abschnitt Technische Dokumentation für CCAM DSP User) erreicht werden. Das speziell entwickelte Frontend für den Demonstrator A10 wurde in Matlab implementiert und wird auf Wunsch source-offen zur Verfügung

gestellt. Dieses Frontend hat Lizenz-Constraints und braucht beim Anwender folgende Lizenzen:

- Matlab Basis
- Industrial Communications Toolbox

Aufgrund dieser Einschränkungen ist die Bereitstellung eines Standalone-Frontends nicht möglich.

#### *Demonstrator Testfeld Niedersachsen*

Eine Übergabe des Demonstrators geschieht in der Form einer Bereitstellung des Web-basierten Frontends. Dazu können die verschiedenen Dashboards unter den folgenden URLs abgerufen werden:

- <https://ts.dlr.de/digest/> → Visualisierung der Messquerschnittsinformationen
- <https://ts.dlr.de/digest/gma/> → Visualisierung der Glättemeldeanlageninformationen
- <https://ts.dlr.de/digest/aa/> → Visualisierung der Anzeigequerschnittsinformationen

Die Links können mit einem Standardbrowser (z.B. Chrome und Firefox) aufgerufen werden. Der Zugriff ist durch die Eingabe von Benutzernamen und Passwort geschützt. Die Zugangsdaten sind den zuständigen Personen übergeben worden. Hinweis: aufgrund der Auslegung als Demonstrator, ist das Frontend nicht für die gleichzeitige Nutzung mehrerer Clients ausgelegt. Wenn Änderungen an den Einstellungen auf der Website vorgenommen werden (z.B. andere Auswahl in den Combo-Boxen) werden Änderungen zum Teil auf andere verbundene Clients propagiert.



### 3.5. Betreibermodell

#### **Ausgangslage vor Projektstart und geplante Vorgehensweise:**

Ein wesentlicher Einflussfaktor für das Erstellen eines Betreiberkonzeptes in DIGEST war die Definition des richtigen Detaillierungsgrades und Inhalts des Digitalen Zwillings sowie die dazugehörigen Prozesse zu Erstellung, Betrieb und Absicherung von deren Qualität, sowie die Zusammenführung und Nutzbarmachung bereits vorhandener Daten.

Bei zu genauer Detaillierung – bzw. zu hoher Detailliertheit für manche Anwendungsfälle - entstehen unnötige Aufwände, welche mitunter sogar exponentiell steigen und übertriebene Kosten ohne entsprechenden Nutzen verursachen. Andererseits müssen alle „relevanten“ Inhalte bzgl. der avisierten Anwendungen enthalten sein. Insbesondere müssen alle relevanten Einflussfaktoren, Effekte und Wechselwirkungen für die jeweilige Anwendung des Digitalen Zwillings ausreichend abgebildet sein. Bei den Wechselwirkungen ist zu beachten, dass zwischen allen Faktoren in der Regel viele, teilweise entgegengerichtete und konfliktäre Abhängigkeiten bestehen. Durch die Validierung des Konzeptes und der Demonstration wurden notwendige Vorarbeiten geleistet, um für die durchgeführten Demonstratoren das nötige Maß an Detailliertheit des DZ festzulegen.

Im Rahmen des Projektes wurde auf Basis eines Informationsmodelles und der Umsetzung mittels OPC-UA Architektur ein Konzept für den Betrieb eines Digitalen Zwillings erarbeitet, der unterschiedliche Anwendungsfälle mit deren spezifischen Informationsgruppen und -genauigkeiten abbilden kann. So wurde eine mögliche zukünftige Plattform erstellt, die für den Support von automatisierten Fahrzeugen die Basis bilden kann. Über die sogenannte „CCAM Decision Support Platform“ – dieser Begriff wurde vom DIGEST Konsortium anstelle des Wortes „Digitaler Zwilling“ verwendet – können für die automatisierten Fahrzeuge notwendige Informationen von unterschiedlichen Quellen (Backends) gesammelt, veredelt und für die Fahrzeuge und deren Informationssysteme in der notwendigen Qualität (zeitlich, inhaltlich) über verschiedene Kanäle und Frontends (z.B. C-ITS) den automatisierten Fahrzeugen zur Verfügung gestellt werden.

Aufbauend auf dieser Plattform wurden zukünftige Datenaustauschprozesse diskutiert und ein Rollenmodell auf Basis ITIL erarbeitet. Im Rahmen von DIGEST wurden ausschließlich vorhandene Daten der ASFINAG bzw. vom Testfeld Niedersachsen eingesetzt. Dahingehend wurden noch keine detaillierten Datenaustauschprozesse dokumentiert.

Vielmehr wurde gleich auf operativer Ebene zwischen Vertreter\*innen von DIGEST und den jeweiligen Fachabteilungen z.B. bei der ASFINAG Datenzugänge geöffnet und vorhandene Daten ausgetauscht. So konnte gleich eine Qualitätssicherung der Daten durch einen externen Abnehmer durchgeführt und manche Mängel in den Daten behoben werden.

Nachfolgend werden die **Ergebnisse bezüglich des Betreibermodells** dargestellt:

### **Strukturaufbau des Digitalen Zwillings von DIGEST**

In Anlehnung auf das erarbeitete Konzept werden nachfolgend die Komponenten des Digitalen Zwillings (DZ) im Zusammenhang mit dem Betreibermodell dargestellt. Jeder Zulieferer (Provider), welcher entweder Daten oder Informationen für den DZ zur Verfügung stellt, muss eine definierte Daten-Qualität garantieren. Dies wird über festgelegte Performance Indikatoren überprüft. Zusätzlich müssen rechtliche und organisatorische Rahmenbedingungen geschaffen werden. Die Vereinbarungen zwischen den Providern und dem Betreiber des DZ werden über Verträge geregelt. Um bedarfsweise Fehlermeldungen oder Änderungswünsche an den Provider weiterzugeben, muss jeder die verantwortlichen Kontaktpersonen nennen. Wie im Konzept beschrieben werden die einzelnen Daten oder Informationen zu Informationsgruppen zusammengefasst, welche wiederum vom Informationsabnehmer über ein (eigenes) Frontend abgerufen werden. Zwischen dem oder der Abnehmer\*in und dem/der Betreiber\*in des DZ werden ebenfalls Verträge aufgesetzt, um die rechtlichen Rahmenbedingungen zu klären.

Damit Probleme oder Änderungswünsche schnell und gezielt bearbeitet werden können, soll ein Single Point of Contact (SPoC) eingerichtet werden. Der oder die Abnehmer\*in kann dann den SPoC verständigen, welcher wiederum die Anfragen an die zuständigen Kontaktpersonen weiterleitet.



Nachfolgende Tabelle 10 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Rollen/Ansprechpersonen.

**Tabelle 10 Generische ITIL-Rollen in einem Digitalen Zwilling**

Rollen	Definition
Product Developer	Produktverantwortung
Demand Manager	Vertreter der Kundensicht
Change Manager	Umsetzung von Änderungen
Service Operation Manager	Betriebsverantwortung für Produkt
Service Desk	Verantwortet Entstörung
Problem Manager	Verantwortet Problemmanagement

### **Produkte**

Im Projekt DIGEST wird als *Produkt* „ein Datensatz, welcher von einer Organisation/Firma oder einem Sensor geliefert wird“ definiert. Dies bedeutet, dass der Datensatz im Backend vorhanden ist. Datensätze von unterschiedlichen Datenlieferant\*innen, welche den gleichen *Informationstypen* liefern, zum Beispiel Verkehrszählungen oder Temperaturmessergebnisse, werden im Anschluss zu einer *Informationsgruppe* im DZ zusammengefasst. Je nach Use Case kann ein *Informationsverwender* eine oder mehrere Informationsgruppen über ein eigenes Frontend abrufen. Im Digitalen Zwilling werden jene Informationen (Backend) aufgenommen, welche für aktuelle Use Cases benötigt werden. Um für potenzielle Informationsverwender einen Überblick zu geben, zu welchen Informationsgruppen bereits Produkte vorhanden sind, ist in der nachfolgenden Tabelle 11 eine erste Produktliste für den DIGEST Demonstrator auf der A10 vorhanden. Diese wird bei Bedarf und je nach Use Case, der unterstützt werden soll, ergänzt.

**Tabelle 11 Erste ITIL-Produktliste für den DIGEST Demonstrator auf der A10**

Nr	Informationsgruppe	Produkte (Details)	Unterstützungsbedarf des AF
<b>A Physische Nutzbarkeit</b>			
1	Physische Nutzbarkeit	Befahrbare Fläche	Mittel
2	Physische Nutzbarkeit	Fahrbahnverlauf/Topographie	Hoch (Baustelle)
3	Physische Nutzbarkeit	Kurvenradius	Niedrig
4	Physische Nutzbarkeit	Durchfahrtsprofil	Niedrig
5	Physische Nutzbarkeit	Maximalgewicht	Niedrig
<b>B Fahrphysikalische Randbedingungen</b>			
6	Fahrphysikalische Randbedingungen	Windrichtung und -stärke	Niedrig (Hoch bei Sturm)
7	Fahrphysikalische Randbedingungen	Griffigkeit	Hoch
8	Fahrphysikalische Randbedingungen	Fahrbahnoberflächenzustand	?
<b>C Topologie</b>			
9	Topologie	Wegenetz (als gerichteter Graph)	Hoch (Baustelle, Ziel-Quellverkehr-Regelungen)
<b>D Bewegungsregeln</b>			
10	Bewegungsregeln	Fahrstreifengeometrie	Hoch (Baustelle/Maut/Rettungsgasse/...)
11	Bewegungsregeln	Typbeschränkungen	Mittel
12	Bewegungsregeln	Geschwindigkeitslimits	Hoch (Zusatztafeln)
13	Bewegungsregeln	Überholverbot	Hoch (Zusatztafeln)
14	Bewegungsregeln	Verfügbare Fahrstreifen	Hoch (Baustelle/Incident)
<b>E Offered Services</b>			
15	Offered Services	an Menschen gerichtete Services	Niedrig
16	Offered Services	an das Fahrzeug gerichtete Services	Hoch
<b>F Erforderliche Nutzungsberechtigungen</b>			
17	Erforderliche Nutzungsberechtigungen	Vignettenpflicht	Hoch
18	Erforderliche Nutzungsberechtigungen	Mautpflicht	Hoch
<b>G Verkehrslage</b>			
19	Verkehrslage	Reisezeit	Mittel
20	Verkehrslage	Verkehrsvolumen	Mittel
21	Verkehrslage	Kapazitäts-Reserve	Mittel
22	Verkehrslage	Durchschnittliche Geschwindigkeit	Mittel
<b>H Infrastruktursupport</b>			
23	Infrastruktursupport	Verfügbarkeit von Positionierungsdiensten	Hoch (vor allem wo nicht verfügbar)
24	Infrastruktursupport	Verfügbarkeit von Connectivity (4G, 5G, WLAN, etc)	Hoch (vor allem wo nicht verfügbar)
25	Infrastruktursupport	Inhalte, die über C-ITS/andere ausgetauscht werden (können) (senden, empfangen)	Hoch (vor allem wo nicht verfügbar)
<b>I Umfeldsensorische Randbedingungen</b>			
26	Umfeldsensorische Randbedingungen	Helligkeit	Mittel (Tunnel, sensorabhängig)
27	Umfeldsensorische Randbedingungen	Nebel/Sichtweite	Hoch (sensorabhängig)
28	Umfeldsensorische Randbedingungen	Niederschlag	Hoch (sensorabhängig)

Für jedes Produkt sollen die festgelegten Rollen von der Organisation/Firma des Produktes definiert werden, um im Bedarfsfall einen oder mehrere Ansprechpartner dem Betreiber des Digitalen Zwillings zur Verfügung zu stellen.

### **Service Operation (Service Desk)**

Um Kosten und Prozesse zu optimieren ist ein strukturiertes Service Management unabkömmlich. Das Service Management beinhaltet einen Single Point of Contact (SPoC). Dieser ist der Kontakt nach außen für die Annahme von Störungen oder geplanten Wartungen. Um die Qualität von einzelnen Produkten, und dadurch die Qualität für den Digitalen Zwilling als Ganzes, sicherzustellen werden Leistungsindikatoren festgelegt. Die Leistungsindikatoren sind ein Mindeststandard, welcher für den Digitalen Zwilling notwendig ist. Aufgrund der laufenden Entwicklungen des Stands der Technik gilt die Empfehlung diese Festlegungen bedarfsweise zu überdenken und anzupassen.

### **Single Point of Contact (SPoC)**

Einrichtung eines Kontaktes für die Annahme von Störungen und Festlegung von Leistungsindikatoren. Dieser zeichnet sich aus durch:

- Mail-Fach
- Service Level
- Reaktionszeit
- Verfügbarkeitsstatistiken

### **Leistungsindikatoren KPIs für das Service Management**

- Anzahl der angenommenen E-Mails/Zeit
- Anzahl nicht vertragskonformer Incidents pro Zeiteinheit
- Durchschnittliche Bearbeitungszeit von Incidents
- Erstlösung pro Zeiteinheit
- Kundenzufriedenheitsindex (Befragung)

## Prozesse für den Datenaustausch: Wartung und Problembehebung

Der SPoC empfängt die Anfragen für Probleme und Änderungswünsche. Die in Abbildung 31 dargestellten Prozesse zeigen generelle Abläufe für die Wartung und die Problembehebung. Dabei werden zunächst die Probleme oder Änderungswünsche erfasst und eine Kategorisierung und Priorisierung wird jeweils durchgeführt. Je Meldung wird ein Ticket erstellt, dem Zuständigen weitergeleitet und je nach Priorisierung von diesem abgearbeitet.

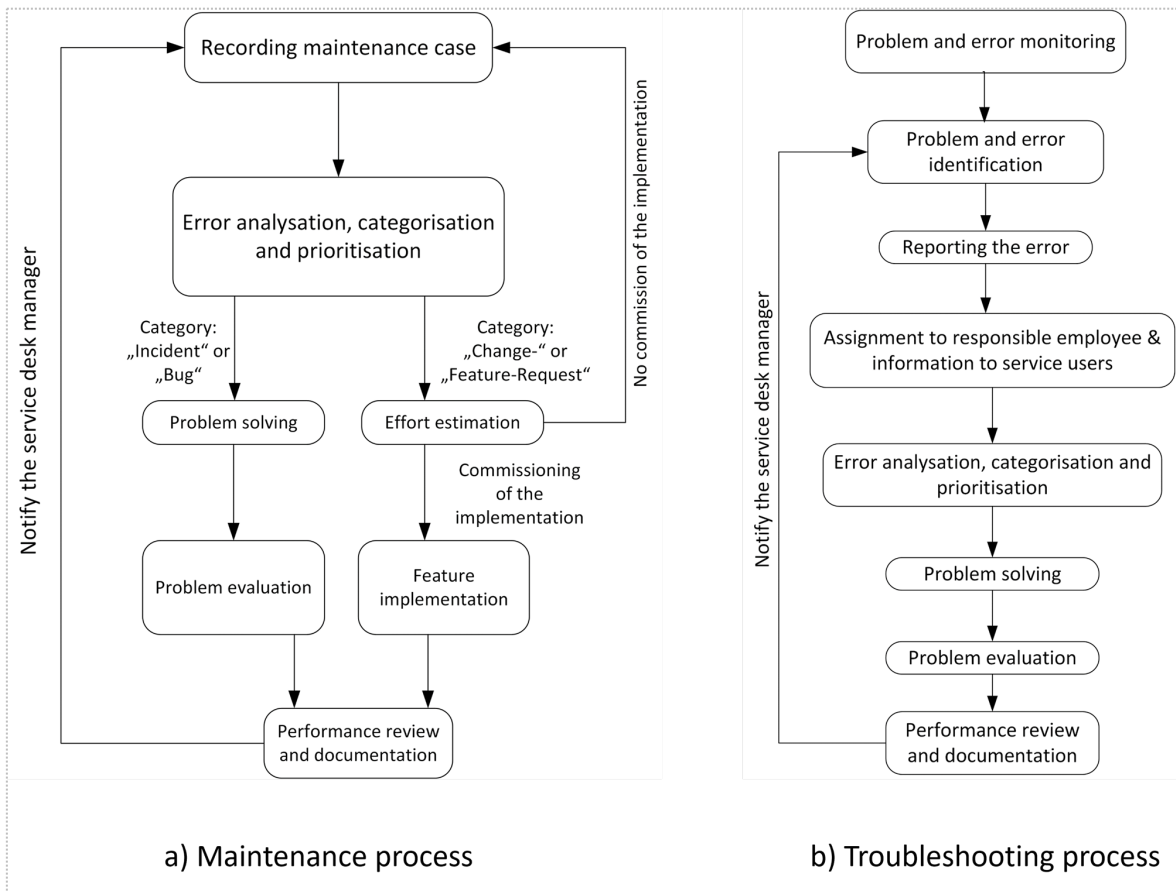


Abbildung 31 Wartungs- und Problembehebungsprozesse

## Informationen für den Datenaustausch

Für den Austausch unterschiedlicher Informationen über den Digitalen Zwilling sollen Anforderungen für den Datenprovider bzw. an die Datenqualität festgelegt werden. Die Performance Indikatoren können je nach Datenart (u.a. Verkehrsinformation, Navigationsdaten) variieren.

Aufgrund anfallender Kosten je Provider müssen diese in einer Vereinbarung zwischen Datenprovider und Betreiber des Digitalen Zwillinges festgehalten werden. Unterschiedliche Modelle sind denkbar, wie zum Beispiel „pay per use“ oder zeitliche Abrechnungsmodelle (Pauschalen pro Tag/Woche/Monat/Jahr). Die konkrete Bepreisung von sogenannten „Datenaustausch-Paketen“ konnte im DIGEST Projekt aufgrund des derzeitigen Entwicklungsstandes noch nicht ermittelt werden. Weiters gilt es in Datenaustauschvereinbarungen rechtliche, organisatorische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. Für eine konkrete Umsetzung und die dafür notwendigen Ausführungen in diesen Bereichen war das Projekt noch nicht ausgereift genug. Rollenmodelle wie z.B. beim Projekt [EVIS.AT](#) [12] für eine Kooperation von unterschiedlichen Datenlieferanten für die Zurverfügungstellung eines bundesweiten Informationssystems sollten bei Nachfolgeaktivitäten hinsichtlich Betreibermodelle berücksichtigt werden. In Bezug auf rechtliche Rahmenbedingungen als Basis für C-ITS Verkehrsinformationen sei auf aktuelle Entwicklungen auf nationaler und europäischer Standardisierungsaktivitäten und Security-Initiativen an dieser Stelle verwiesen. Der aktuelle Status von C-ITS Nachrichten als reine Informationsquelle könnte sich in Zukunft ändern, wenn es um verbindliche Informationen für z.B. Intelligent Speed Advisory Services von OEMs geht. Diese rechtliche Thematik ist auf nationaler (z.B. Masterplan Digitalisierung) und auf europäischer Ebene zu lösen (z.B. ERTRAC – functional safety topic) und kann hier nur als ein notwendiger nächster Schritt dokumentiert werden, um CCAM-Services erfolgreich in den Markt zu bringen.

### **SLA Performance Indikatoren**

In diesem Abschnitt werden Performance Indikatoren (PI) je Datentyp genannt. Die PI dienen der Absicherung der Qualität seitens des Datenproviders.

1. Serviceverfügbarkeit: Die Serviceverfügbarkeit beschreibt in welchem Zeitraum die Datenprovider eine Meldung annehmen. Dieser kann entweder 8/5 oder 24/7 (h/Anzahl der Wochentage) betragen.
2. Wiederherstellungszeit: Die Wiederherstellungszeit beschreibt die maximale Dauer an Tagen, um das Service wieder herzustellen.
3. Wartungsinformation: Um notwendige Wartungen durchführen zu können, sollen Datenprovider eine Wartungsinformation vorab aussenden. Diese beinhaltet die Informationen, wann die Wartung stattfindet und den Zeitpunkt ab wann das Service



wieder zur Verfügung steht. Die Wartungsinformation wird an den SPoC des Digitalen Zwillinges gesendet, welcher wiederum an die betroffenen Datennutzer\*innen die Information weiterleitet.

### **Datenformate und Schnittstellen**

Um unterschiedliche Informationen zu übertragen oder abzurufen haben sich bereits unterschiedliche Datenformate und Schnittstellen etabliert. Diese unterscheiden sich im Verwendungszweck, der technischen Übertragung sowie der möglichen übertragbaren Datenmenge. Für den Betrieb des Digitalen Zwillinges ist es erforderlich diese Datenformate zu kennen, um unterschiedliche Daten in die Architektur zu integrieren.

### **Herausforderung für ein nachhaltiges und dynamisch nachjustierbares Betreibermodell**

Sowohl auf Ebene der Europäischen Straßenbetreiber (z. B. in CEDR CAD Group und den Projekten der letzten und der aktuell laufenden CCAM-Ausschreibungen) als auch aus der Abstimmung mit Schlüssel-Stakeholdern auf Ebene aktueller EU-Ausschreibungen und in D-A-CH wird evident, dass effiziente und effektive Einführung von Elementen eines Betreibermodells nicht mehr durch einzelne Unternehmen und Organisationen allein umgesetzt werden kann. Es bräuchte eine **verstärkte, kooperative und wechselseitig ergänzende Zusammenarbeit** in der Entwicklung und dem Betrieb zwischen den Automobilherstellern, Straßenbetreibern sowie der öffentlichen Verwaltung, Technologie-Anbietern und neuer Informationsdienstleister. Der Weg dorthin stellt aktuell eine wesentliche Einführungsbarriere dar.

Als Erweiterung aus den informellen Abschlusspräsentationen zu den Projektergebnissen wurde angeregt, spezifisch auf Barrieren und antizipierte Hindernisse bei der Ausarbeitung und Umsetzung zu einem nachhaltigen Betrieb und zu Rahmenbedingungen einzugehen. Hier ist neben der sich dynamisch entwickelnden Rolle von OEMs besonders folgende Frage offen: "Wer wartet Rahmenbedingungen und einen diesbezüglichen „Frame of Reference“ dynamisch oder kann diesen bei an sich verändernden Stakeholder-Kontexten nachjustieren?" Daraus lassen sich mehrere Zeitpunkte für ‚richtige Kooperationsentscheidungen‘ antizipieren. Zu diesem Zweck ist ein enger und proaktiver Erfahrungsaustausch mit Stakeholdern auf Ebene der CEDR CAD Group als prioritär für ein nachhaltiges Management von System- und Technologierisiken zu betrachten.

Verschiedene Technologien und neue Services werden im Rahmen eines Deployments voraussichtlich unterschiedliche Kostenverläufe und Vor- und Nachteile aufweisen – wenn stark steigende Fahrzeugraten und verschiedene Anbieterskalierungen aufeinander reagieren.

Die nächsten Schritte bezüglich der rechtlichen, organisatorischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für den Betrieb einer „CCAM Decision Support Platform“ sind in Kapitel 4 enthalten.

### 3.6. Dissemination

Folgende nationale und internationale Disseminationsaktivitäten wurden in der Berichtsperiode gesetzt bzw. wurden nach dem offiziellen Projektende noch durchgeführt:

- ITS Europe Toulouse (Konferenzbeitrag, SiS Koordination), Mai 2022
- C-ITS Demo von ANDATA beim ATTC, Oktober 2022
- Beitrag bei der ITS-Austria Konferenz, 4.11.2022
- TRA Lissabon (Konferenzbeitrag), November 2022
- ASECAP Days 2022 Brüssel (Präsentation), Oktober 2022
- Methodische Abstimmung mit ausgewählten Schlüsselpersonen im ähnlich gelagerten CEDR Projektvorhaben TM4CAD

Zusätzlich zu den oben erwähnten Konferenzaktivitäten wurde ein Non-Paper bezüglich einer inhaltlichen Weiterführung des DIGEST Projektes (inklusive Lex2Vehicle [20] und Symul8 [22]) in deutscher und englischer Sprache erstellt (siehe Kapitel 4 und Anhang CCAM Decision Support Platform Non-Paper (Englisch)). Dieses Non-Paper fasst die Kernelemente von DIGEST zusammen und kann für eine inhaltliche Exploitation der Projektinhalte national und international verwendet werden.

Weiters wurde eine Disseminationsaktivität gesetzt, die auch national und international zur Erläuterung der Wichtigkeit von digitalen Zwillingen für die weiteren Aktivitäten von Straßenbetreibern eingesetzt werden kann. Es wurde ein DIGEST Video ([Deutsch](#) [7] und [Englisch](#) [8]) erstellt, das die Herausforderungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Echtverkehr und vor allem die derzeitigen Engpässe (Baustellen, Tunnel,

schlechtes Wetter) aufzeigt, wo Level-3 automatisiertes Fahren seine Grenzen hat. Durch die Unterstützung der Infrastruktur mittels Informationen (ISAD) kann das automatisierte Fahren (die ODD der Fahrzeuge) erweitert werden.

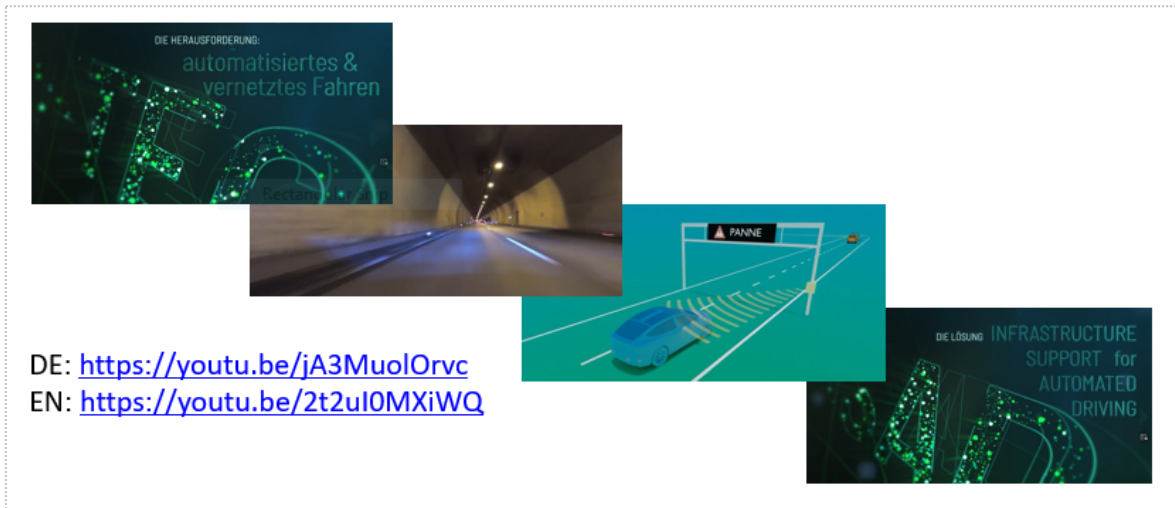


Abbildung 32 DIGEST Projektvideo D/E

Vorbereitungsgespräche zum weiteren Austausch mit Vertreter\*innen der Automobilindustrie konnten in der Projektphase durchgeführt werden. Bei diesen Gesprächen sind die DIGEST Ergebnisse auf hohes Interesse gestoßen. Als wesentliches Element der Dissemination der Projektergebnisse im Hinblick auf Innovationsmodell und Architektur wurde das Paper „UNPUBLISHED: IEEE-Paper „Infrastructure-based digital twins for cooperative, connected, automated driving and smart road services“ verfasst. Dieses Paper ist derzeit im zweiten Review-Prozess des Fachjournals IEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems.

## 4. NÄCHSTE SCHRITTE FÜR DIE UMSETZUNG DES DIGEST KONZEPTEES

Für die nächsten Schritte zur Umsetzung des in DIGEST erarbeiteten Konzeptes eines digitalen Zwillings für das Verkehrssystem Straße wurde ein Ergebnispapier mit dem Titel „CCAM Decision Support Platform“ verfasst (Non-Paper), das nachfolgend in den Bericht integriert wurde.

### CCAM Decision Support Platform

In Deutschland, Österreich und der Schweiz werden seit vielen Jahren Forschungsvorhaben im Bereich der Verkehrsinfrastrukturforschung beauftragt und durchgeführt. In der D-A-CH Kooperation Verkehrsinfrastrukturforschung - 5. Ausschreibung (2020) konnten Projekte zum Thema „Automatisierung“ in folgenden Schwerpunkten eingereicht werden: (1) Verkehrssimulation zur Anpassung von Verkehrsregeln, (2) Digitaler Zwilling des Verkehrssystems Straße und (3) Digitalisierung verkehrsrechtlicher Anordnungen.

Dieses **Non-Paper fasst** die **Ergebnisse** der drei auf die oben genannte Ausschreibung eingereichten, genehmigten und durchgeführten Projekte **SYMUL8 [22]** (Antwort auf 1-Verkehrssimulation zur Anpassung von Verkehrsregeln), **DIGEST** (Antwort auf 2-Digitaler Zwilling des Verkehrssystems Straße) und **LEX2VEHICLE [20]** (Antwort auf 3-Digitalisierung verkehrsrechtlicher Anordnungen) zusammen. Die Projektlaufzeit der drei Projekte reichte von 1.9.2020 bis 30.9.2022. Erstellt wurde das Dokument von Wolfgang Schildorfer (Projektleiter Projekt DIGEST).

Im Projekt **DIGEST** wurde demonstriert, wie Straßenbetreiber bei unterschiedlichen Herausforderungen im Verkehrsmanagement allgemein und beim kooperativen und automatisierten Fahren im Speziellen effektiv unterstützt werden können. Dazu wurde ein Informationsmodell auf Basis einer bereits im industriellen Kontext kommerziell eingesetzten IT-Architektur (OPC UA) erarbeitet. Die Prinzipien des Modells lassen sich auch für weitere Themenfelder, wie z.B. Asset Management erweitern. Das in **DIGEST** erarbeitete Konzept wird als **CCAM Decision Support Platform** bezeichnet.

Das in DIGEST erarbeitete **Informationsmodell** (Basis: DIKW-Modell - *Data, Information, Knowledge, Wisdom*) als eine fortgeschrittene Form von Informationsmanagement stellt einen wesentlichen Beitrag zur Abbildung eines homogenen Gesamtlagebildes des

aktuellen Verkehrsgeschehens und des Straßenzustands zur produktiven Aufnahme in Abteilungen für Entscheidungen in der vernetzten kooperativen Mobilität, dem Verkehrsmanagement und auch dem Asset-Management bei Straßenbetreibern dar.

Die organisatorische Komplexität des Themas „Automatisiertes und vernetztes Fahren“ ergibt sich vor allem aus dem Umstand, dass die effiziente und effektive Einführung nicht mehr durch einzelne Unternehmen und Organisationen allein umgesetzt werden kann. Insbesondere bedarf es einer **verstärkten, kooperativen und ergänzenden Zusammenarbeit** in der Entwicklung und dem Betrieb zwischen den Automobilherstellern, Straßenbetreibern sowie der öffentlichen Verwaltung, Technologie-Anbietern und neuer Informationsdienstleister.

Diese **Kooperation** wird sich in den nächsten Jahren mit hoher Wahrscheinlichkeit **dynamisch verändern**. Verschiedene Technologien und neue Services werden im Rahmen eines Deployments voraussichtlich unterschiedliche Kostenverläufe und Vor- und Nachteile aufweisen – wenn stark steigende Fahrzeugraten und darauf aufbauende Managemententscheidungen digital unterstützt werden sollen. Somit stellt sich aus Sicht eines Straßenbetreibers vermutlich mehrfach die Frage nach „der richtigen“ Kooperationsentscheidung und „der im Technologiezyklus vorteilhaften Investitionsentscheidung“. Bei der antizipierten Wissensdynamik kann sich kein Akteur auf die Rolle eines Käufers zurückziehen; eigenes Wissen zu Konzepten, Vor- und Nachteilen und nächsten „Wendepunkten“ im Hochlauf und den damit verbundenen Kosten muss von mehreren oder vielleicht sogar allen kompetenten Kooperationspartnern dynamisch aufgebaut und nachjustiert werden. Die Rolle der D-A-CH Region und ihrer Schlüssel-Stakeholder in diesem Themenfeld konnte weiter gefestigt und konsolidiert werden.

Im Projekt DIGEST konnte **hohes Interesse ausgewählter OEM-Stakeholder-Vertreter\*innen** an der CCAM Decision Support Platform und den Anwendungsfällen ODD-Erweiterung durch Infrastruktur-Support (vgl. ODD-Einschränkungen des Mercedes Drive Pilot), Intelligent Speed Advisory und Collective Perception geortet **und erste Termine mit OEM-Vertreter\*innen** durchgeführt werden.

DIGEST und die darin entwickelte **CCAM Decision Support Platform** bildet den **Überbau** der drei D-A-CH Projekte. Nachfolgendes Bild zeigt das Konzept der CCAM Decision Support Platform. **Informationen** aus den unterschiedlichen Backend-Modulen (Datenquellen wie z.B. GIP, ASFINAG Datex-II Datenstreams,

Straßenoberflächenbeschaffenheitsdaten aus dem EU-Projekt [ESRIUM](#) [11], lokale Verkehrssimulationsdaten wie aus dem Projekt Symul8, juristische Informationen wie Verordnungen aus dem Projekt Lex2Vehicle, etc.) werden in der CCAM Platform integriert und je nach notwendiger Anwendung als Quelle verschiedener Frontends (z.B. C-ITS Message Bereitstellung der Infrastrukturanbieter, Dashboards als Basis für Verkehrsmanagement-Entscheidungen oder auch interne Asset-Management Entscheidungen) verwendet. **Technische Basis ist OPC UA** (Open Platform Communications Unified Architecture). OPC UA ist ein in der Industrie bewährter Standard für den Datenaustausch als plattformunabhängige, service-orientierte Architektur (SOA). OPC UA stellt bereits alle notwendigen Basis-Mechanismen für den Daten- und Informationsaustausch zur Verfügung (Informationsmodellierung, Gültigkeitsmanagement, Rechteverwaltung, Zugangskontrollen, etc.). In der Demonstrationsphase hat sich OPC UA als geeignet erwiesen, unterschiedliche Anwendungsfälle mit diversen Informationsanforderungen, verschiedenen Datenquellen (Backends) und Datenausgabemöglichkeiten (Frontends) abzubilden.

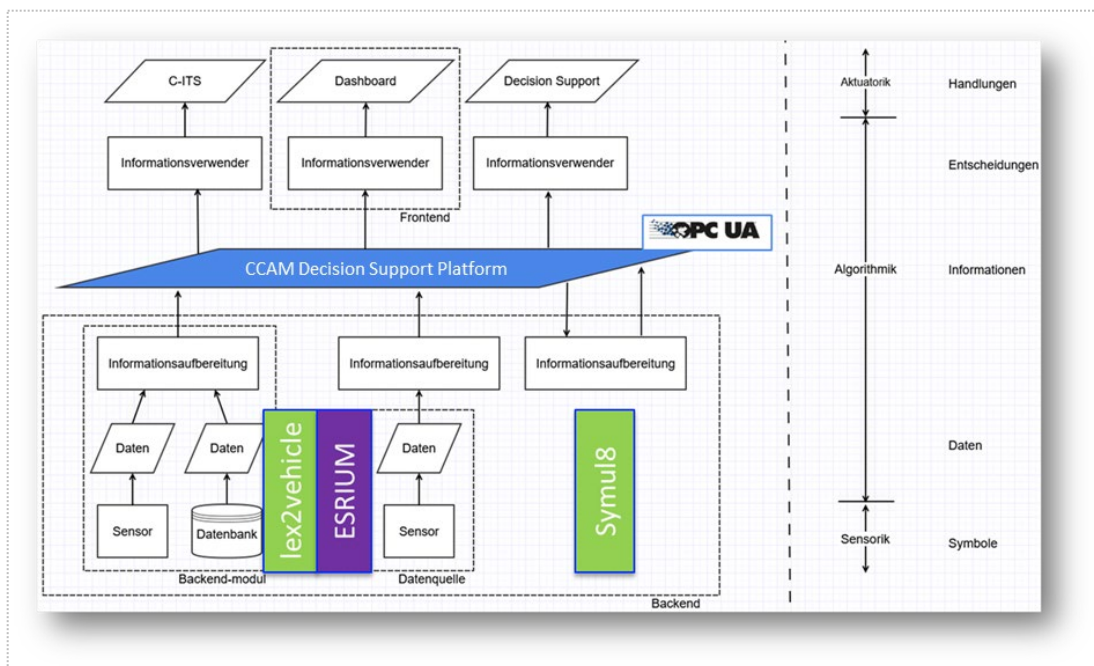


Abbildung 33 CCAM Decision Support Platform Informationsmodell und Architektur mit OPC UA Ansatz

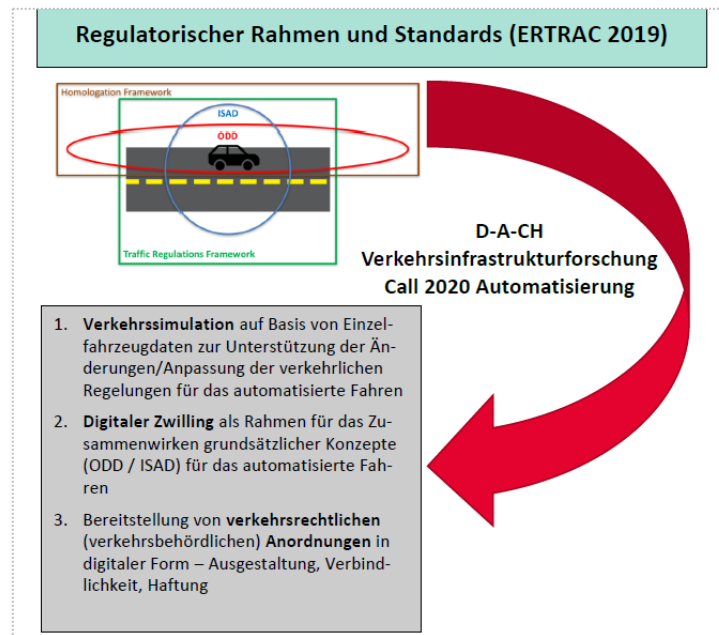
Für jede menschliche Verkehrsteilnehmer\*in sollte an jeder Stelle im Straßennetz zu jedem Zeitpunkt und in jeder Situation möglichst eindeutig sein, was sie\*er tun darf und was nicht. Dies gilt im übertragenen Sinne auch für jedes automatisierte Fahrsystem. Damit dies zur

Realität werden kann, sind sehr grundlegende Überlegungen anzustellen, wie eine neuartige, digitale und für die maschinelle Verarbeitung optimierte Veröffentlichung des Straßenverkehrsrechts. Ergebnis vom Projekt [Lex2Vehicle](#) [20] ist eine Dokumentation, in welcher die notwendigen inhaltlichen, organisatorischen und technischen Rahmenbedingungen und Strukturen einer an die Anforderungen automatisierter Fahrzeuge angepassten Formulierung des Straßenverkehrsrechts sowie der technischen Normierung der Kommunikation und Interpretation festgeschrieben sind. Sie zeigt auf, wie das Straßenverkehrsrecht den bestehenden und zukünftigen Anforderungen der Digitalisierung gerecht werden kann und den Handlungsspielraum für menschliche Verkehrsteilnehmerinnen und automatisierte Fahrzeuge gleichermaßen definiert beziehungsweise zielgruppenspezifisch kommuniziert.

Neben den technologischen und organisatorischen Entwicklungen automatisierter Fahrzeuge müssen auch erforderliche Änderungen und eine Anpassung der verkehrlichen Regelungen für das automatisierte Fahren insbesondere im Mischverkehr mitgedacht werden. Hier bieten Simulationsmodelle die Möglichkeit die Auswirkungen unterschiedlicher Ausgestaltungen der rechtlichen Rahmenbedingungen, verkehrlicher Regelungen, Fahrzeugfahrverhalten sowie Infrastrukturgegebenheiten miteinander in Kontext zu setzen, zu modellieren und zu evaluieren. Im Projekt [Symul8](#) [22] wurde eine Simulationsplattform bestehend aus den zwei etablierten Simulationsmodellen PTV VISSIM und SUMO geschaffen, mit welcher die Auswirkungen künftiger automatisierter Fahrfunktionen auf Verkehrseffizienz und -sicherheit bereits in der frühen Entwicklungsphase von automatisierten Fahrfunktionen bewertet werden können. Symul8 [22] adressiert mit dem Ansatz der modular aufgebauten Simulationsplattform sowohl Fahrzeugentwickler, Straßen- und Infrastrukturbetreiber als auch Verkehrsplaner und ermöglicht ein breites Anwendungsgebiet.

### **Wichtige Erkenntnisse und Fragestellungen für eine CCAM Decision Support Platform**

Die Ergebnisse der drei Projekte DIGEST, Symul8 [22] und Lex2Vehicle [20] untermauern die ursprüngliche Zielsetzung der Ausschreibung aus dem Jahr 2020, die nachfolgend im Kern dargestellt ist.



**Abbildung 34 Kern der D-A-CH Verkehrsinfrastrukturforschungsausschreibung, Call 2020  
Automatisierung**

Die nach Projektende nun mögliche Beantwortung von zumindest Teilen der jeweiligen Forschungsfragen erzeugt ein Gesamtbild dessen, wie durch Simulation (SYMUL8 [22]), Digitalisierung der Daten (DIGEST) und Digitalisierung der Regulierungen (Lex2Vehicle [20]) die sichere und verkehrseffiziente Einführung von vernetzten automatisierten Fahrzeugen durch die Bedarfsträger mitgestaltet werden kann.

Auf Seiten der aktuellen österreichischen und internationalen Themenkonjunktur sind **kulturelle Spezifika, Inklusion, Ressourcenknappheit, Aspekte der Kreislaufwirtschaft und Nachhaltigkeit** nahezu zwingend in eine Diskussion zum Thema „CCAM Decision Support Platform“ zu **berücksichtigen**. Zusätzlich muss das Thema **in die Strategievorarbeiten zu Digitaler Infrastruktur** und zu Begleitmaßnahmen im Kontext automatisierte Mobilität **eingepasst** werden.

**Laufende Monitoringaktivitäten:** In dem dynamischen Umfeld sind **Entwicklungen** bei anderen Straßenbetreibern und im Ökosystem digitaler Verkehrsinfrastrukturen **laufend zu beobachten und** internationale Bewertungen auf die Konsequenzen für die D-A-CH Ebene zu **evaluieren**. Dies gilt besonders hinsichtlich **alternativer Harmonisierungs- und Standardisierungsbestrebungen** unterschiedlicher Akteure. Auch wie mit **Barrieren** für eine **unternehmensübergreifende Kooperation** im Kontext einer CCAM Decision Support Platform umgegangen wird, sollte explizit in ein proaktives Monitoring



aufgenommen werden (z.B. Welche Barrieren ergeben sich bei einem Monitoring und Sharing von Informationsqualität und insbesondere von Informationen Dritter?)

Wesentliche **Fragestellungen** stellen dabei auf ein **dynamisches Nachjustieren** der potentiellen Machbarkeit und Konsequenzen einer CCAM Decision Support Platform für einen nationalen Straßenbetreiber ab. Weiters wird zu berücksichtigen sein:

- **Welche Daten** und Datenquellen sind bei einer sich dynamisch entwickelnden Ausbreitung von verschiedenen CCAM-Anwendungen prioritär zur Verfügung zu stellen und in welchen Qualitäten?
- **Welche Informationen** sind für die angestrebten Services ausschlaggebend und brauchen welche Datenquellen/-eigenschaften?
- Inwieweit kann ein Fokus auf **Maintenance** den Bereich einer vielleicht kontrollierbareren **ersten Anwendung** sein?
- Inwieweit wäre eine effizientere und effektivere **multimodale Kooperation inklusive Verkehrsmanagement** eine **prioritäre Anwendung**?
- Wie können **zukünftige automatisierte Fahrzeugservices** wirksam unterstützt werden?
- Besonders wenn **Drittanbieter** in einer Kooperationsbeziehung mitberücksichtigt werden, erfordert dies weitreichende **Veränderungen** in Prozessen und Vereinbarungen?
- Wie **robust** ist das **Business-Ökosystem** und wie können Risiken berücksichtigt werden, dass ein nachhaltiges Ökosystem entwickelt wird oder sich entwickeln kann (z.B. Datenangebote verschwinden oder das Kosten-/Preis Verhältnis verändert sich sehr stark)?
- Wie kann der richtige oder vorteilhafte **Zeitpunkt** für bestimmte **Kooperationsentscheidungen** oder für bestimmte Wechselentscheidungen für breitere Stakeholder-Communities nachvollziehbar kommuniziert werden?

## Nächste Schritte

Ziel ist es, die **Erkenntnisse aus den drei Projekten weiterzuentwickeln und an den Schnittstellen entsprechend zusammenzuführen**. Gemeinsames und Spezifisches gibt es sowohl in Bezug auf die Projekte als auch in Bezug auf die drei Länder. Dies gilt es herauszuarbeiten und sowohl horizontal als auch vertikal zu vertiefen.

Die **Rolle der Bedarfsträger** in der inhaltlichen Gestaltung der Ausschreibung und in der konsequenten und durchgehenden Betreuung der Projektkonsortien (Informationen zur Verfügung stellen, Abstimmung der Umsetzung der F&E Projekte über die gesamte Laufzeit) sollte als erfolgreiches Abwicklungsmodell dargestellt und als eine zukunftsweisende Form von F&E Auftragsforschung vorgeschlagen werden.

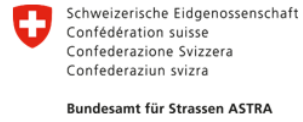
Eine Weiterentwicklung der Projektergebnisse könnte in **drei Schritten/Phasen** erfolgen:

- (1) **operativ kurzfristige Weiterführung** der Kooperation zwischen DIGEST-Projektpartnern und dem ESRIUM-Projektpartner ASFINAG. Somit könnte die begonnene dazu genutzt werden, die ESRIUM Projektergebnisse im Bereich Asset-Management in den Demonstrator der CCAM Decision Support Platform mit Echt Daten zu integrieren.
- (2) **Weiterführung** der Projektergebnisse **auf nationaler bzw. D-A-CH Ebene** durch die weitere Ausarbeitung der Informationsmodelle für Anwendungsfälle im Bereich des Verkehrsmanagements und des vernetzten und automatisierten Fahrens (z.B. ISA) in enger Kooperation mit ausgewählten OEMs.
- (3) **Weiterführung** der Projektergebnisse in einem **europäischen Kontext (EU-Projekt)** als Basis für eine europäische Standardisierung der Ergebnisse (z.B. Nord-Süd Korridor durch Europa, wo ISA umgesetzt wird) in enger Kooperation mit OEMs. In diesem europäischen Kontext soll auch die Basis für eine europäisch harmonisierte digitale Veröffentlichung von StVO geschaffen werden. Infrastrukturbetreiber aller Ebenen (Bund/Länder/Gemeinden) müssen genauso wie Verkehrsbehörden in den gesamten Prozess integriert sein, da ihnen in der Umsetzung eine zentrale Rolle zukommt. Insofern sollte ihnen eine projektbegleitende Rolle zuteilwerden, um die praktische Umsetzbarkeit der F&E-Ergebnisse sicherzustellen.

Das englische Non-Paper zur CCAM Decision Support Platform ist als Beilage dem Bericht hinzugefügt worden (CCAM Decision Support Platform Non-Paper (Englisch)).

## REFERENZEN UND QUELLEN

- [1]. Ackoff, R. L. (1989). From data to wisdom. *Journal of applied systems analysis*, 16(1), 3-9.
- [2]. [Advanced Load Balancer, Web Server, & Reverse Proxy - NGINX](https://www.nginx.com/), <https://www.nginx.com/>
- [3]. [AIM-Backend - DLR Portal](https://www.dlr.de/content/de/grossforschungsanlagen/aim-backend.html), <https://www.dlr.de/content/de/grossforschungsanlagen/aim-backend.html>
- [4]. [Apache Kafka](https://kafka.apache.org/), <https://kafka.apache.org/>
- [5]. [de.bitctrl.dav.rest/de.bitctrl.dav.rest.raml at master · bitctrl/de.bitctrl.dav.rest \(github.com\)](https://github.com/bitctrl/de.bitctrl.dav.rest), [de.bitctrl.dav.rest/types.raml at master · bitctrl/de.bitctrl.dav.rest \(github.com\)](https://github.com/bitctrl/de.bitctrl.dav.rest)
- [6]. Chomsky, Noam. "Three models for the description of language." *IRE Transactions on information theory* 2, no. 3 (1956): 113-124.
- [7]. [DIGEST Video Deutsch](https://youtu.be/jA3MuolOrvc), <https://youtu.be/jA3MuolOrvc>
- [8]. [DIGEST Video Englisch](https://youtu.be/2t2u10MXiWQ), <https://youtu.be/2t2u10MXiWQ>
- [9]. [FreeOpcUa/opcu-client-gui: OPC-UA GUI Client \(github.com\)](https://github.com/FreeOpcUa/opcu-client-gui), <https://github.com/FreeOpcUa/opcu-client-gui>
- [10]. <https://contentportal.asfinag.at/data>
- [11]. <https://esrium.eu/>
- [12]. <http://evis.gv.at/>
- [13]. <https://opcfoundation.org>
- [14]. <https://www.alp-lab.at/>
- [15]. <https://www.gjp.gv.at/>
- [16]. <https://www.project-cope.eu>
- [17]. <https://www.unified-automation.com/products/development-tools/uaexpert.html>
- [18]. [kb.tmVerkehrGlobal \(nerz-ev.de\)](http://kb.tmVerkehrGlobal(nerz-ev.de)), [kb.tmUmfeldDatenGlobal \(nerz-ev.de\)](http://kb.tmUmfeldDatenGlobal(nerz-ev.de)), [kb.tmAnzeigenGlobal \(nerz-ev.de\)](http://kb.tmAnzeigenGlobal(nerz-ev.de))
- [19]. Kritzinger, Werner, Matthias Karner, Georg Traar, Jan Henjes, and Wilfried Sihm. "Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification." *Ifac-PapersOnline* 51, no. 11 (2018): 1016-1022.
- [20]. [Lex2Vehicle](https://projekte.ffg.at/projekt/3900283), <https://projekte.ffg.at/projekt/3900283>
- [21]. [Python opcu-asyncio Documentation — opcu-asyncio documentation](https://github.com/FreeOpcUa/opcu-asyncio), [FreeOpcUa/opcu-asyncio: OPC UA library for python >= 3.7 \(github.com\)](https://github.com/FreeOpcUa/opcu-asyncio), [opcu-asyncio/examples at master · FreeOpcUa/opcu-asyncio \(github.com\)](https://github.com/FreeOpcUa/opcu-asyncio)
- [22]. [Symul8](https://projekte.ffg.at/projekt/3900280), <https://projekte.ffg.at/projekt/3900280>
- [23]. Thonhofer, Elvira, Simon Sigl, Martin Fischer, Fin Malte Heuer, Andreas Kuhn, Jacqueline Erhart, Manfred Harrer, and Wolfgang Schildorfer. "Infrastructure-based digital twins for cooperative, connected, automated driving and smart road services.", submitted for review in *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems*



## ANHANG

## Interviews und Workshops im Rahmen der Stakeholderanalyse in DIGEST

Tabelle 12 Interview und Workshops im Rahmen der Stakeholderanalyse in DIGEST

Datum	Inhalt	Teilnehmer*innen	Agenda
09.11.2020 11:00-11:30	<b>AP 2 Abstimmungsrunde</b> Erste Schritte	Sandra Ulrich, AI Michael Leitner, AN Carina Schwab, AN	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Erste Schritte</li> <li>2. Festlegung Termine</li> </ol>
18.11.2020 13:30-15:30	<b>AP 2 Abstimmungsrunde</b> Strukturierung AP	Sandra Ulrich, AI Carina Schwab, AN Simon Sigl, AN	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Stakeholder Entscheidungsfragen</li> <li>2. Fragebogen</li> <li>3. Aufgabenverteilung</li> <li>4. Strukturierung Excel</li> </ol>
02.12.2020 9:00-11:00	<b>AP 2 Abstimmungsrunde</b> Anforderungsmanagem ent & Zusammenführung Fragebogenergebnisse	Sandra Ulrich, AI Carina Schwab, AN Simon Sigl, AN Martin Fischer, DLR	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Zusammenführung &amp; Besprechung Fragebogenergebnisse</li> <li>2. Stakeholder-Analysen</li> <li>3. Stakeholder-Gruppierungen</li> <li>4. Entscheidungsfragen-Gruppierung</li> <li>5. Weiteres Vorgehen</li> <li>6. Vorbereitung Kick-Off mit AG</li> </ol>
18.01.2021 9:00-11:00	<b>AP 2 Abstimmungsrunde</b> Entscheidungsfragen & Anwendungsfälle	Sandra Ulrich, AI Michael Leitner, AN Carina Schwab, AN Martin Fischer, DLR	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ergebnisse Kick-Off (Anpassungsbedarf, etc.)</li> <li>2. Ziele AP2 nochmal konkretisieren und den Weg dahin ableiten</li> <li>3. Aktueller Status &amp; Aktuelle Tasks</li> </ol> <p>Stakeholder Entscheidungsfragen Anwendungsfälle Daten Allgemein</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Festlegung weiteres Vorgehen</li> </ol>
10.02.2021 9:30-11:00	<b>Workshop Testfeld</b> Testfeld Niedersachsen Anwendungsfälle Q&A	Martin Fischer, DLR David Reisenbichler, AI Sandra Ulrich, AI Andreas Kuhn, AN Michael Leitner, AN Carina Schwab, AN Walter Aigner, HI Wolfgang Schildorfer, LS	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Vorstellung Testfeld Niedersachsen</li> <li>2. Diskussion Use Cases</li> </ol>

<p>12.02.2021 10:30-11:30</p>	<p><b>AP 2</b> <b>Abstimmungsrunde</b> Entscheidungsfragen, Anwendungsfälle &amp; Daten</p>	<p>Sandra Ulrich, AI Michael Leitner, AN Carina Schwab, AN Martin Fischer, DLR</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Deliverable Struktur und Aufgaben</li> <li>2. Aktueller Status &amp; Aktuelle Tasks</li> </ol> <p>Stakeholder Entscheidungsfragen Anwendungsfälle Daten Modell</p>
<p>24.02.2021</p>	<p><b>Experteninterview</b> Daten Pavement Management</p>	<p>Sandra Ulrich, AI Mario Krmek, ASFINAG</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kurzer Projektüberblick – Digitaler Zwilling des Verkehrssystems Straße</li> <li>2. Verfügbare Daten (Art, Format, Aktualität, Qualität, Schnittstellen) im PMS</li> <li>3. Geplante Entwicklungen des PMS bzw. zum Thema Oberbaudaten</li> <li>4. Wünsche zum Oberbau Asset Management – wie sieht die optimale Zukunft aus?</li> <li>5. Diskussion von Ideen für Anwendungsfälle, die für das Oberbau Asset Management interessant sein könnten</li> </ol>
<p>25.02.2021</p>	<p><b>Experteninterview</b> Daten Asset Management</p>	<p>Sandra Ulrich, AI Christoph Antony, ASFINAG</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kurzer Projektüberblick – Digitaler Zwilling des Verkehrssystems Straße</li> <li>2. Verfügbare Daten (Art, Format, Aktualität, Qualität, Schnittstellen) im Asset Management</li> <li>3. Geplante Entwicklungen im Asset Management hinsichtlich Datenerfassung</li> <li>4. Wünsche zum Oberbau Asset Management – wie sieht die optimale Zukunft aus?</li> <li>5. Diskussion von Ideen für Anwendungsfälle, die für das Oberbau Asset Management interessant sein könnten</li> </ol>
<p>26.02.2021</p>	<p><b>Experteninterview</b> Daten ITS/C-ITS</p>	<p>Sandra Ulrich, AI Leonard Hoffmann, ASFINAG</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kurzer Projektüberblick – Digitaler Zwilling des Verkehrssystems Straße</li> <li>2. Verfügbare Daten (Art, Format, Aktualität, Qualität, Schnittstellen) im Asset Management</li> </ol>

			<ol style="list-style-type: none"> <li>3. Geplante Entwicklungen im Asset Management hinsichtlich Datenerfassung</li> <li>4. Wünsche zum Oberbau Asset Management – wie sieht die optimale Zukunft aus?</li> <li>5. Diskussion von Ideen für Anwendungsfälle, die für das Oberbau Asset Management interessant sein könnten</li> </ol>
02.03.2021	<b>Experteninterview</b> Daten BIM	Sandra Ulrich, AI Odilo Schoch, ASTRA Hong An Sandlin, ASTRA	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kurzer Projektüberblick – Digitaler Zwilling des Verkehrssystems Straße</li> <li>2. BIM Umsetzungsstrategie Astra</li> <li>3. Anforderungen an BIM Projekte hinsichtlich Daten (Format, Aktualität, Qualität, Schnittstellen)</li> <li>4. Geplante Entwicklungen BIM</li> <li>5. Wünsche zu BIM – wie sieht die optimale Zukunft aus?</li> <li>6. Diskussion von Ideen für Anwendungsfälle, die aus BIM Sicht interessant sein könnten</li> </ol>
30.03.2021	<b>Experteninterview</b> Straßendatenbank	Sandra Ulrich, AI Daniel Schüller, BAST	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kurzer Projektüberblick – Digitaler Zwilling des Verkehrssystems Straße</li> <li>2. Straßendatenbank</li> <li>3. Bundesinformationssystem Straße</li> </ol>
04.03.2021	<b>Konsortiums-workshop</b> Status AP2 und Diskussion Anwendungsfälle/DZ Ideen	David Reisenbichler, AI Sandra Ulrich, AI Andreas Kuhn, AN Michael Leitner, AN Carina Schwab, AN Martin Fischer, DLR Walter Aigner, HI Wolfgang Schildorfer, LS	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Status Stakeholder Daten Tasks/Use Cases             <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Modellierungsansatz Kontextmodell (global) Funktionsmodell (konkrete DZ Ideen)                 <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Konkrete DZ Ideen (und zugehörige Use Cases)</li> <li>2. Weiteres Vorgehen</li> </ol> </li> </ol> </li> </ol>
11.03.2021 10:00-11:00	<b>Abstimmung AP2</b> Finalisierungsarbeiten	Sandra Ulrich, AI Michael Leitner, AN	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Deliverable Struktur und Aufgaben</li> <li>2. Aktueller Status &amp; Aktuelle Tasks</li> </ol>

		Carina Schwab, AN	Stakeholder Entscheidungsfragen Anwendungsfälle Daten Modell
15.03.2021 9:30-11:00	<b>Workshop Testfeld</b> Digitaler Zwilling Ansatz im Testfeld Alp.LAB	Patrick Luley, Joanneum Research David Reisenbichler, AI Sandra Ulrich, AI Andreas Kuhn, AN Michael Leitner, AN Carina Schwab, AN Walter Aigner, HI Wolfgang Schildorfer, LS	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Vorstellung Alp.LAB</li> <li>2. Vorstellung Digitaler Zwilling/UHB Map Alp.LAB</li> <li>3. Diskussion UHD Map Definition</li> <li>4. Diskussion Anforderungen an UHB Map</li> <li>5. Diskussion Anwendungsfälle</li> </ol>
21.04.2021 14:00-15:00	<b>Abstimmung AP2</b> Vorbereitung Ergebnispräsentation & Workshop AP 2	Sandra Ulrich, AI Michael Leitner, AN Carina Schwab, AN	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aktueller Status</li> <li>2. Workshop Vorbereitung</li> <li>3. Ergebnispräsentation Vorbereitung</li> </ol>
07.05.2021 10:00-12:00	<b>Ergebnispräsentation AP2</b> Ergebnispräsentation & Workshop AP 2	Hauke Fehlberg, Astra Manfred Harrer, ASFINAG Lutz Rittershaus, BAST Sandra Ulrich, AI David Reisenbichler, AI Wolfgang Schildorfer, LS Andreas Kuhn, AN Walter Aigner, HI	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ergebnisse AP 2</li> <li>2. Diskussion der Ergebnisse AP 2</li> <li>3. Geplante Vorgehensweise AP 3</li> </ol>

Legende für Tabelle: ARNDT IDC (AI), ANDATA (AN), DLR (DLR), Hitec (HI), Logistikum Steyr (LS)



## BEILAGEN

## **UNPUBLISHED: IEEE-Paper „Infrastructure-based digital twins for cooperative, connected, automated driving and smart road services**

Das Manuskript der (angestrebten) Journalpublikation ist derzeit noch nicht publiziert und daher streng vertraulich zu behandeln! Titel: „Infrastructure-based digital twins for cooperative, connected, automated driving and smart road services“ (Beilage: DIGEST\_Technical\_Paper\_221216\_0845.pdf). Ziel-Journal: IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems

# Infrastructure-based digital twins for cooperative, connected, automated driving and smart road services

Elvira Thonhofer\*, Simon Sigl\*, Martin Fischer†, Fin Heuer†, Andreas Kuhn\*,  
Jacqueline Erhart‡, Manfred Harrer‡, Wolfgang Schildorfer§

<sup>1</sup>ANDATA, 5400 Hallein, Salzburg, Austria

<sup>2</sup>German Aerospace Center (DLR), Braunschweig, Lower Saxony, Germany

<sup>3</sup>ASFINAG, Vienna, Austria

<sup>4</sup>University of Applied Science Upper Austria, Steyr, Austria

CORRESPONDING AUTHOR: Fin Heuer (e-mail: fin.heuer@dlr.de).

**ABSTRACT** Driving requires continuous decision making from a driver taking into account all available relevant information. Automating driving tasks also automates the related decisions. However, humans are very good at dealing with *bad quality, fuzzy, informal and incomplete* information, whereas machines generally require solid quality information in a formalized format. Therefore, the development of automated driving functions relies on the availability of machine-usable information. A digital twin contains quality controlled information collected and augmented from different sources, ready to be supplied to such an automated driving function. An information model that describes all conceivably relevant information is necessary. To this end, a list of requirements that such an information model should meet is proposed and each requirement is argued for. Based on the anticipated services and applications that such a system should support, a collection of requirements for system architecture is derived. Information modeling is performed for selected relevant information groups. A system architecture has been proposed and validated with three different implementations, addressing several different applications to support decisions at a highway tunnel construction site in Austria and throughout the Test Bed Lower Saxony in Germany.

**INDEX TERMS** automated driving, cooperative connected automated mobility, decision support system, digital twin, information modelling, test bed

## I. INTRODUCTION

Autonomous and automated driving has become one of the most challenging technological problems over the last decade. Engineers aim to improve traffic with respect to safety, comfort, efficiency and effectiveness simultaneously. However, these goals are in conflict [1], which makes finding satisfactory solutions so difficult. Significant international research and development efforts for automated driving functions have yet to yield reliable, high-performance autonomous vehicles that can operate in a broad range of traffic situations.

Approaches aligned with these efforts are information sharing, connected driving, and infrastructure-supported driving. For example, infrastructure might be able to provide information that is impossible or very difficult to be acquired by the vehicle itself. This raises many unresolved questions, including what information is best shared, in what form and quality must it be made available, and how safety and

security can be ensured. These questions are addressed in this paper by putting the collaboration of infrastructure and vehicle on a solid basis.

The acquisition of all necessary information for automated driving tasks may take a joint effort of different stakeholders and organizations. The group of stakeholders in automated driving is diverse and contains not only car manufacturers but also infrastructure managers, road service providers, traffic managers, map vendors, vehicle operators, policymakers, and legislature among others. Each of these stakeholders is involved in different automation tasks which encompass making certain decisions. Automating a decision requires that information about all relevant aspects of the task are available to the decision making entity. An infrastructure based digital twin [2] of a traffic system is not only a digital model of a real world traffic system, but also enables decision making that affects the real world in a closed loop by providing *information* to decision making entities. Such

digital twins or model based controllers with live updates have already been proposed in [1], [3]–[7] among others. It is worth pointing out that all considered stakeholders are in a symbiotic relationship that is rooted in the quality of the content of the digital twin. This work aims to address the problem of what aspects of the world should be represented in a digital twin and how, so that a set of decisions can be made.

The decision making process for humans differs significantly from the process for algorithms/machines in several ways. Humans are very good at dealing with partial, fuzzy information and can fill in the blanks by experience and context knowledge [8]. If information is of insufficient quality, a risk-lowering (not necessarily minimizing) action can often be found. In contrast, a machine requires information in a formalized format meeting quality standards. Incomplete or missing information is often a show-stopping problem and the automated acquisition of missing context is often infeasible, e.g., [9].

For machines as for human drivers, a driving task can be performed if the capability of the (automated) driver exceeds the complexity of the given task [10]. The complexity of a task is mainly determined by factors that can not be controlled by the driver and describes how much and which information about their surroundings, environment and situational context must be available to the driver. In contrast, the capabilities of the (automated) driver are determined by the available information, its utilized algorithms and hardware. The capabilities determine a vehicle’s or automated driving function’s Operational Design Domain (ODD). Both the algorithms and the built-in hardware can be considered operating constraints that can not be modified in a meaningful way outside of software updates (which can be performed by the manufacturer only) or hardware replacements (which can be performed by a mechanic). However, *information* can be made available during a vehicle’s (or driver’s) operation and is therefore of major significance for the success of automated driving functions.

Automated driving systems can acquire information from three different sources:

- on-board sensors (e.g., video cameras, radar and lidar sensors),
- communication networks (e.g., Vehicle To Everything (V2X)-communication or other connectivity services),
- databases and data stored in memory (e.g., maps for navigation).

Traditionally, a vehicle’s Advanced Driving Assistance System (ADAS) primarily relies on its on-board sensors, sometimes adding map data. This approach results in independent vehicles or automated driving functions. However, the task complexity that can be handled by a function is limited which often results in a restrictive ODD. For example, the worlds first SAE Level 3 series system *DRIVE PILOT* [9] was introduced in spring 2022 by Mercedes-Benz. Its ODD is strictly

limited to freeway sections in mint condition during good weather and explicitly excludes tunnels and construction sites. However, additionally utilizing information collected by other traffic participants or by the road infrastructure could significantly extend a vehicle’s capabilities and thereby extend its ODD. Modern communication technology enables V2X communication from a technological point of view [11], [12], but in order to actually utilize information communicated by a third party, a number of show-stopping open issues must be addressed.

This work aims at providing a conceptual as well as technical background that enables sharing information across traffic participants and infrastructure providers. In Sec. III, the fundamental idea of communicating at *information level* is argued for, the necessity of a reference information model is addressed, and a set of requirements for information models is proposed. Lastly, the relationship between the ODD of a function or vehicle, a reference information model and the infrastructure support level (ISAD) is discussed. Sec. IV addresses requirements on a technical realization of a digital twin based infrastructure support system. In Sec. V, a solution concept that meets these requirements is proposed and in Sec. VI the solution concept is implemented for several real-world demonstration use cases where information modeling was performed for relevant information groups, validating the introduced concept for the digital twin based decision support platform. Finally, in Sec. VII an extensive discussion is provided that covers general open issues as well as specific technical aspects of the implementation.

## II. RELATED WORK - open for discussion

The concept of Digital Twins (DTs) is well established in smart manufacturing and became even more relevant with advancements in the Internet of Things (IoT). An overview of the current standards landscape for DTs and the IoT is provided in [13], which cover aspects of resource description, discovery and access. These aspects are relevant to applications outside of manufacturing as well. In [14] an overview of works that aim at technology transfer from manufacturing to smart city applications and the application of DTs in traffic fleet management specifically, is provided. Works on DT applications in the context of smart cities and federated learning are surveyed in [15]. At the same time a vast body of research exists on autonomous vehicles and enabling technologies such as 5G [16] which often hinge on the utilization of a suitable DT. However, smart road applications at the intersection of automated driving, collective perception and smart traffic management are not explicitly covered by these surveys.

Generally speaking, technological frameworks, protocols and standards for, DTs description and data exchange exist and can be utilized in many different DT applications. However, each DT is a custom design when it comes to data/information modelling and interoperability of different digital twins. A first step in the direction of requirements

formulation for information models is given in [17] where high-level requirements are identified and described from the perspective of manufacturing. However, no requirements on information itself and its representation are given.

With many different participants, both in traffic and as infrastructure providers, the amount of data that is potentially available for sharing with all other participants exceeds practical limits. To overcome this problem, it is necessary to establish a suitable level of abstraction for message content that ideally reduces both data volume and computational effort for message interpretation. To the authors' knowledge this issue has not been addressed previously and is therefore addressed in this work.

### III. METHODOLOGY

Based on a vehicle's ODD, a set of scenarios can be determined that the vehicle can cope with. Such scenarios include factors of the environmental conditions, the state of traffic control and management, the traffic regulations and laws, the composition and behavior of traffic participants, the vehicle's and driver's intentions, conditions and capabilities including the capability to acquire information with on-board systems. A smart road service aims at supplementing a vehicle's perception of the world. Therefore, communication between traffic participants and infrastructure is central. In order to improve aspects of traffic (e.g., safety, flow, density, etc.), two questions must be addressed: First, what content should be communicated? Second, how should the content be represented?

#### A. ABSTRACTION LEVELS FOR CONTENT REPRESENTATION

Content may potentially be presented at any level of abstraction, e.g., signal, data, information, knowledge or even action (loosely following the Data, Information, Knowledge and Wisdom (DIKW) model [18]). However, communication is not practical at all levels. These levels are discussed using a 100 km/h speed limit on a highway, traditionally communicated via a physical traffic sign, as a working example. Table 1 maps speed limit aspects to each abstraction level.

TABLE 1: A 100 km/h speed limit mapped to each level of a DIKW model.

Level	Description
Signal	numbers 1 and 0 in black on a circular, white and reflective metal plate with a red border
Data	traffic sign "100 km/h speed limit" at specific location
Information	100 km/h max. driving speed, within a defined region, all day, valid for all regular vehicle types
Knowledge	my speed should not exceed 100 km/h
Action	appropriate maneuver plan

One could consider each level representing a different natural language. The same meaning (semantic) might then be communicated in any of these languages. Message syntax would then be the specific wording in that language. There would be advantages or disadvantages in using a particular language.

Presenting content on the *signal* level would involve transmitting all features and characteristics of the traffic sign. Each participant must combine these received features and classify the particular traffic sign. This process is not robust: occlusion, incomplete feature sets, or contradicting features pose problems. Also, equivalent traffic signs may differ in appearance among countries.

Presenting content on the *data* level would involve transmitting the position and type of the traffic sign. This seems familiar since it mimics the established style of communication from road authority to the human driver. Furthermore, it reduces robustness problems and is less verbose compared to the *signal* level. But, inferring the speed limit requires additional data, e.g., another (later) traffic sign ending the speed limit.

Presenting content on the *information* level would involve transmitting a complete description of the speed limit, including the obvious maximum velocity but also the geographic, situational, and temporal scope as well as addressed vehicle types. This leaves little room for interpretation due to inference/classification failures or errors caused by incomplete *data* or *signals* such as missing the corresponding cancellation sign.

Presenting content on the *knowledge* level would involve transmitting a message like 'your speed should not exceed 100 km/h', but, 'because you pull a particular trailer, your speed should not exceed 80 km/h'. This requires that the sender knows something about the receiver. Generally speaking, communication on the knowledge level requires the sender to have access to additional characteristics like vehicle type, driver's license type, toll sticker, axis load, etc., with disadvantages in the technical and legal areas. In this working example, converting information into knowledge is equivalent to the mental step that a human driver takes when recognizing a speed limit sign at a location (information) and concluding that "this particular sign is applicable to me".

Presenting content on the *action* level would involve transmitting recommendations, like 'you should slow down', or even (remote) commands that might reach through to a connected vehicle's braking system. This essentially means that the sender would perform tasks that are traditionally performed by the driver (or an automated driving (AD) function). This is in conflict with international agreements which state that the driver [19] or the AD function [20] has to be in control of their vehicle at all times. Besides legal questions, it is doubtful that proper consideration of the full situational context can be ensured by other entities than the driver.

The discussion above indicates that *presenting content at the information level is most advantageous*. This approach ensures feasibility and upwards-compatibility with respect to (future) sensor systems and avoids legal issues regarding driver or AD function responsibility. The responsibility to correctly derive knowledge from information and situational context remains with the driver, an AD function or, generally, the receiver. At the same time it does not merely replicate the established way to communicate (via traffic signs), which is difficult to standardize for international applicability [21] and error prone regarding completeness and correctness of the transmitted information.

### B. SHORT SURVEY OF INFORMATION MODELS FOR SMART ROAD SERVICES

An *information model* for smart road services declares and structures all conceivable relevant information. The notion of an information model is sometimes also referred to in the literature as *data model* or *ontology*.

Given that smart roads and autonomous driving is a highly dynamic and young field of research, the landscape of standards, formats, tools, and methods has not yet converged to a homogeneous, universally accepted, and well-structured state of the art. The platform *connected automated driving*<sup>1</sup> collects about 170 published standards and more than 30 standards in development, among those e.g., Taxonomies for ODD [22]–[24], Scenario representation [25], Safety and Edge Cases [26]. Standardization efforts for communication in traffic at the information level in recent years were fruitful and yielded a group of published standards, e.g., [27]. These documents define groups of C-ITS messages suitable to express different types of information relevant for smart road services.

Since these standards focus on applications within a declared scope, they, by design, only partially cover the spectrum of potentially relevant information. In the context of smart roads and Autonomous Driving (AD), diverse situational aspects are relevant for different stakeholders. Stakeholders include traffic participants, vehicle or component manufacturers, insurance, road network operation and maintenance, multi modal traffic planning, and test field operation. Each stakeholder is interested in specific information or aspects of smart road services, based on their respective responsibilities to perform (a group of) tasks.

Currently, there is no universally accepted information model covering all conceivable aspects of smart road services. Towards the vision of such a unified reference information model, a concise set of requirements is proposed in Sec. III.C that serves as a starting point.

### C. REQUIREMENTS ON INFORMATION MODELS

Different smart road services focus on different sub-sets of information. This might introduce a tendency to appli-

cation specific sub-sets that express the same information represented in different (and possibly incompatible) ways. A unified reference information model would support the convergence of development efforts and interoperability of systems. Towards such a universally acceptable reference information model, a requirement-driven approach appears best suited.

Table 2 proposes requirements on information to facilitate development and standardization efforts towards a reference information model. Thereby, the focus is on information content (*what*), and not on systems, sensors, hardware, or communication technology (*how*), which are covered in Sec. IV.

The first two requirements in Table 2 are closely related to the discussion in Sec. III.A, where an argument for the information level is made. Requirement I01 addresses the distinction between data and information, I02 addresses the distinction between information and knowledge. Requirements I03–I05 address representation of content. The last requirement I06 covers generality as a prerequisite for worldwide applicability.

I01: The requirement that content must be *source agnostic* ensures the applicability of any conceivable perception method. With this requirement met, information can be provided not only by currently available technology but also by future sensors based on novel sensing technologies. This means that perception technology can be changed and updated in the background without requiring changes to the information model or at the receiver side.

I02: Being *receiver agnostic* means that content is formulated such that it imposes no restrictions regarding which receiver can utilize the information. It also means that content is not tailored specifically towards a particular receiver. In our working example, all road users receive the information that there is a speed limit in place at the specified time and spatial region, cf. Table 1. However, each road user must determine for themselves whether this speed limit applies to them (i.e., derive specific knowledge from the information).

I03: *Self-contained* information not only supports consistency but also improves robustness against some errors or misunderstandings. As an example, it is desirable that the temporal and spatial scope of a rule and the rule itself are expressed in *one* atomic unit of information. In the working example, the speed limit, its value and its spatial and temporal scope are contained within one unit of information. Note that traffic signs violate this requirement. The *beginning* and *end* of a speed limit are traditionally communicated by two individual traffic signs. If a driver misses the end-sign, they often rely on context and deduce the fact from observing the behaviour of other traffic participants. Based on personal judgment and risk-estimation, they may or may not adjust their driving accordingly.

I04: An *unambiguous* information is hard to misunderstand. Traffic laws and regulations are specifically designed to be unambiguous and achieve this goal to a satisfactory

<sup>1</sup><https://www.connectedautomateddriving.eu/standards/standards-collection/>, accessed September 2021

TABLE 2: Requirements on information and its representation.

ID	Requirement	Description
I01	Source agnostic	Information is provided in a technology neutral way.
I02	Receiver agnostic	Information is valid independent of the receiver.
I03	Self-contained	A piece of information should be complete and atomic.
I04	Unambiguous	Meaning must not be subject to interpretation.
I05	Context-free	Meaning does not depend on the context.
I06	Universal	The diversity of worldwide road traffic shall be expressible.

degree, e.g., traffic signs can easily be distinguished by humans.

I05: However, existing laws and regulations are not *context-free*. The driver needs additional implicit information to perform driving tasks correctly. For example, most countries use right-hand traffic, some use left-hand traffic. Crossing the border from France and the UK requires the driver to switch to left-hand traffic and also drive through roundabouts clockwise, overtake other vehicles passing on the right etc. Context sensitive content is prone to misinterpretation by machines. Therefore, information should be context-free and comply to a Chomsky type 2 grammar [28].

I06: Finally, being *universal* is a necessary condition for international applicability. The requirement is easily stated, but its fulfillment involves significant difficulty. On the one hand, it requires laws and regulations to be self-consistent on both the national and the international level. On the other hand, it calls for an internationally standardized or at least compatible language to express them. A sub-set of this spectrum is already standardized by ETSI, e.g., [27], which defines information that meet many, if not all the above mentioned requirements.

Assume these requirements can be met and an agreeable reference information model can be defined as a super-set of relevant information. Then, one can investigate how this reference model relates to the Infrastructure Support Levels for Automated Driving (ISAD) [29], [30].

#### D. REFERENCE INFORMATION MODEL, ODD AND ISAD

A starting point to explore the relationship between a function's or system's ODD and ISAD, is the definition of ODD. The ODD (of a function or system) describes the Operational Conditions (OC), in which the function or system is designed to operate. Any scenario might be fully inside, outside or partially inside the ODD, depending on the involved tasks and decisions that a system has to cope with. Each task or decision requires characteristic information to deal with.

This implies, that for any scenario to be within a system's ODD, all necessary information must be made available to the system. Let this set of information be denoted *necessary information*. Note that necessary information is specific to both the scenario and the system.

As stated in Sec. I, this information might be acquired by a vehicle's on-board sensors or static databases, or via

communication. Let information communicated from the infrastructure be denoted *smart road service information*. Then, ISAD describes the set of smart road service information together with its quality, that is provided by the infrastructure at any given time and location.

It is beneficial to view necessary information and smart road service information as subsets of a common superset. This might seem trivial, but ensures compatible definitions of information among road users and infrastructure. Assuming this information superset can be unified across relevant scenarios, it can be denoted as *reference information model*, see Fig. 1.

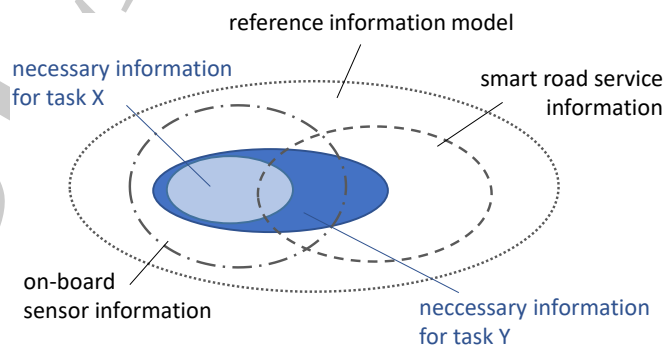


FIGURE 1: Necessary information for certain tasks can be covered by different information sources, e.g., task X (light blue) can be covered solely by on-board sensor information (dash-dotted) even if smart road service (dashed) could support the task as well. Whereas task Y (dark blue) can only be fulfilled by utilizing smart road services in addition to on-board sensor information.

A reference information model harmonizes the views of both sender (e.g., infrastructure) and receiver (e.g., road user) of information, meeting the requirements stated above. Therefore, it aims to be valid across stakeholders, manufacturers and countries. Three application strategies for smart road service information for ADAS/AD systems can then be utilized, see Table 3, which are illustrated by means of a working example.

Imagine an ADAS for lane keeping. The system relies on on-board camera sensors to detect driving lanes. On-board

camera performance deteriorates with declining visibility that might be caused by bad weather conditions.

The example relies on the concepts *capability* of a system and *complexity* of the task (or decisions) [10]. Any task can be associated with a scenario-specific complexity, whereas an ADAS/AD function has a certain capability to perform a task. If the capability exceeds the complexity of the task, it can be completed, otherwise it can not be completed safely.

In this working example, a task is *lane detection*. Its complexity is related to, among other things, the visibility range in relation to driving speed. A given lane detection subsystem exhibits a certain capability, namely, it will work safely up to a specific range of view.

If the infrastructure communicates degraded visibility conditions in a specific region, a vehicle approaching this region might predictively assess, that its lane detection capability will be below the complexity of the task. It therefore might re-route to avoid disengagements caused by leaving its ODD. This is an example for strategy S1 in Table 3.

If the infrastructure provides *lane geometry* information in the region with degraded visibility, the vehicle would be able to perform the lane keeping task despite degraded visibility. Thus, the systems capabilities and ODD are effectively expanded by smart road service information. This is an example for strategy S2.

Another option would be to automatically reduce the maximum driving speed for all traffic participants on the section in question, such that the driving speed is appropriate for the visibility range. Thus, the scenario complexity is reduced to a level where the system's capability exceeds the scenario's complexity. This is an example of strategy S3.

The concept and definition of ISAD was proposed in the EU project INFRAMIX<sup>2</sup>. ISAD also includes a *Quality of Service* description that encompasses attributes of the information such as accuracy, reliability and age of the information. However, the current concept of ISAD and its implications for infrastructure providers and managers are still disputed [34]–[36]. It is to be expected that the concept of ISAD will evolve with better understanding of the requirements. Note, the current concept of ISAD does not strictly comply with the requirements presented in Sec. III.C.

#### IV. REQUIREMENTS ON A TECHNICAL REALIZATION

For a practical realization, a broad spectrum of stakeholders are to be considered, including drivers (human or automated), traffic managers, infrastructure operators, public transport providers, and urban planners. Performing their respective tasks, each group makes heterogeneous decisions based on specific information. Hence, a digital twin with this purpose can be called Cooperative, Connected, Automated Mobility (CCAM) Decision Support Platform (DSP). In order to capture relevant requirements, a thorough stakeholder analysis has been performed [37], modelling stakeholder groups, their tasks, and the information necessary to perform

each task. This allows to deduce on stakeholder and task level,

- which information is required
- in what accuracy, and
- how recent it needs to be.

Guided by these context models, requirements for a technical realization were identified and are presented in Table 4. The requirement descriptions make use of the terms *frontend* and *backend*. A backend is a collection of algorithms that turn data into information. Data can be acquired from different (possibly redundant) sources and may be processed in various ways, including filtering, smoothing, aggregating, combining, estimating, forecasting, and augmenting. A frontend is a system that uses information to extract and present use-case-specific knowledge or make decisions. This may involve visualization, communication, assessment, contextualization, weighing, recommendation or even automated decision making. A backend can be considered a producer of information, a frontend can be considered a consumer of information.

The requirements cover a wide range of different areas and are demanding in their entirety. Some of the requirements mentioned are common in the field of machine and factory automation, where time determinism and guarantees are to be achieved. Others demand flexibility and reliability, as can be achieved through fault-tolerant redundant and distributed systems. In addition, security, and interoperability are important issues.

It is obvious that the number and diversity of requirements demands a mature and proven technology. It is also obvious that not every application can be realized cost-effectively by one and the same system. Thus, a suitable platform architecture is to be aimed for.

#### V. SOLUTION CONCEPT

Based on the identified requirements and the level of abstraction discussed above, this Section proposes an architecture and a solution strategy that, in the authors opinion, allows compliance with all stated requirements.

##### A. ARCHITECTURE

Central questions in the definition of a (platform) architecture are the distribution of tasks to individual components, as well as finding suitable interfaces between these components. The architecture design presented here is based on the DIKW pyramid and the abstraction levels from Sec. III.A. This allows a simple representation of the basic data flow, shown in Figure 2 with exemplary front- and backend configurations.

In this model, content generally flows from bottom to top. Backends use potentially multiple data sources (e.g., sensors, databases, C-ITS messages) to process information. This might involve filtering, noise reduction, sensor fusion, failure handling, missing value replacement, error bounds estimation or prediction as examples. As the provider of

<sup>2</sup><https://www.inframix.eu>



TABLE 3: Strategies for smart road information applications

	S1: ODD fencing	S2: ODD extension	S3: OC simplification
Explanation	Predictive avoidance of scenarios outside the vehicle ODD	Supplementation of necessary information via X2V that cannot be acquired by onboard sensors	Match OC with vehicle capabilities by reducing DDT complexity
Information	Infrastructure provides information about road, traffic, and environmental state and regulations		Vehicles share their intentions, capabilities and ODD
Action	(Automated) Driver changes route, path, and/or driving mode	(Automated) Driver uses information to complete driving task	Traffic management adjusts controllable OC
Applications	Routing & maneuvering with ODD awareness, Dynamic risk rated map [31]	Extended horizon, Collective perception [32]	ODD aware traffic management & control [4], [33], Dynamic risk rated map [31]
Examples	Reroute if tyres do not comply with road condition because of snow	Highway pilot capable of travelling tunnels or construction sites	Issue adaptive speed regulations or headway recommendations

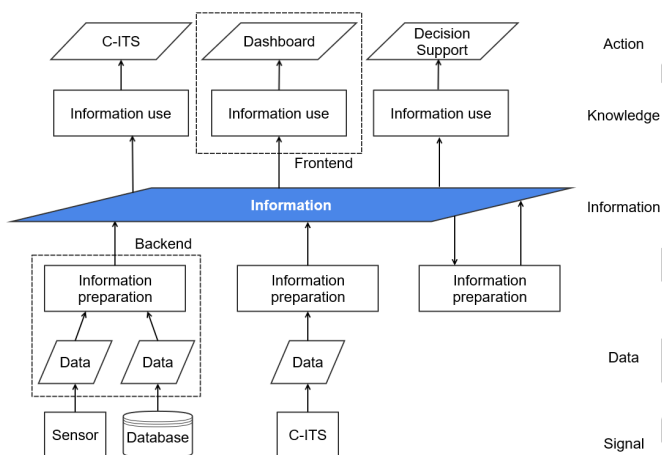


FIGURE 2: Architecture of CCAM DSP realizations. Right margin: Mapping to information pyramid.

information in this scheme, a backend must know the relevant part of the information model (cf. Sec. III.B) and implement a compliant parameterization. A backend can also be sensorless and act as a virtual sensor, relying only on information provided by other backends and aggregating it into higher level information, as indicated in Fig. 2 by the rightmost backend. For example, a traffic simulation may rely on traffic flow information as boundary conditions and may provide optimized traffic control regimes as information to the CCAM DSP.

Up to this point, the information layer can be referred to as a digital *shadow* according to [2], since it is an automatically created image of the real world. A digital *twin* additionally requires automated feedback into the real world, which can be a task of a frontend. Note that providing automated feedback into the real world may create control

loops, showing that a control system can be implemented in accordance with this architecture.

A frontend tailors the provided information to the needs of a specific stakeholder. Its tasks include sharing relevant aspects over a network, visualization, monitoring and evaluation, the suggestion of certain options for action as a decision support system, to a fully automated decision and initiation of corresponding actions. The tasks of a frontend also include compliance with relevant standards and formats, e.g., when information aspects are to be made available via standardized network protocols or C-ITS messages that are broadcast by Roadside Unit (RSU). Additionally, use-case specific role and authorization concepts must be provided by the frontend.

Note that the architecture does not dictate that a frontend must take all of its input from the information layer. For example, if a surveillance system requires the integration of live camera images, these can of course be tapped directly by the frontend and do not have to be made available in the information layer. On the contrary: a camera image does not fulfill the requirements for information (Sec. III.C) but is rather to be classified as a signal.

The information layer is of central importance in this architecture. If the information models are sufficiently standardized, front- and backends can be reused as modular components to create concrete system realizations (provided that the specific technical constraints are sufficiently similar). This once again highlights the need for clean and standardized information models (cf. Sec. III.B).

The proposed architecture enables modular development and operation of such a CCAM DSP, Fig. 3 depicts the stakeholder model. The CCAM DSP User is the entity that makes decisions based on information made available by a frontend and possibly additional information collected from other sources. This stakeholder may be e.g., an ADAS or a highway control manager. The CCAM DSP Operator makes sure that the CCAM DSP is up and running as expected. The

TABLE 4: Design requirements on technical realizations.

Architecture			DT*	RT*
A01	Extensible	Addition of further backends and frontends shall be possible. Incremental/migratory rollout shall be possible.	x	(x)
A02	Modular and reusable	Data sources, information modules and frontends shall be reusable (in different applications).	x	
A03	Distributable	Frontends and backends can run on the same machine, but also on suitably interconnected machines.	x	x
A04	Flexibility	e.g., regarding data volume, cycle time, number of backends and frontends.	x	
A05	Hardware-neutral	There should be no fundamental restriction regarding the computing environment used. e.g., PC, industrial controller, virtual machine, cloud.	x	
Real time				
RT01	Different time scales	Event-based, as well as cyclic depending on the application (ranging from sub-second to weekly).	x	(x)
RT02	Different cycle times	Frontends and backends must be able to run asynchronous, in different cycle times or synchronized.	x	
RT03	Real-time capable	The implementation shall support establishing (end to end) real-time guarantees.	x	
Data sources				
DS01	Robustness	Failures of data sources must not affect overall system operation.		x
DS02	Processing chains	Backends shall be able to use information provided by other backends.	x	
Security				
S01	Authenticity	Information provider must be verifiable.	x	x
S02	Confidentiality	Restriction of read access must be possible.	x	x
S03	Integrity	Information must not be modified in an unauthorized or undetected manner.	x	x
IT				
IT01	Available	A defined (and potentially very high) quality of service level must be reached.	x	x
IT02	Maintainable	Capability for on-line diagnosis and modular software updates.	x	x
Functional requirements on the information model				
F01	Inter-operable	Information models shall be vendor independent and support standardization.	x	
F02	Information quality	Information quality shall be expressible (e.g., timeliness, accuracy, uncertainty).	x	
F03	Metadata	Metadata shall be expressible (e.g., units, data types, encoding, missing/invalid values).	x	

\* DT: Design Time requirement, RT: Run Time requirement

manufacturer of a CCAM DSP integrates and deploys all components of a CCAM DSP that are supplied by frontend and backend developers such that the information pool complies with relevant standards, developed by a standardization body. Lastly, a sensor operator makes sure that relevant sensors are up and running as expected and thereby ensures that necessary measurement data are provided to the backend module.

For the demonstrators presented in this work, most stakeholders are represented exclusively by the authors with two exceptions: Sensor Operator and CCAM DSP User, which were also represented by the operators of the existing data sources used and the project principals, respectively, see Fig. 4 for details.

## B. TECHNICAL BASIS

As described, the information layer is the pivotal point of the proposed architecture. Therefore, the selection of an appropriate technological foundation is crucial for a successful

implementation. At first glance, many technologies from the areas of Industrial Internet of Things, Semantic Web, Cloud Computing, or Databases are candidates. Among those, Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA)<sup>3</sup> meets the full spectrum of requirements from Sec. IV. The existing body of research also suggests, that tools developed for manufacturing such as OPC UA can advantageously used for digital twins in smart city applications as well [14]. In [38] an argument is made for OPC UA and in [17] a set of requirements on information models is provided. Therefore, we consider and favor OPC UA as an implementation technology.

OPC UA is not a protocol, data format, tool, or single standard, but rather an ecosystem that includes all of these for demanding applications, interoperable and vendor-independent. It defines a standardized service-oriented architecture that enables platform-independent data exchange, e.g., [39]. It

<sup>3</sup><https://reference.opcfoundation.org>

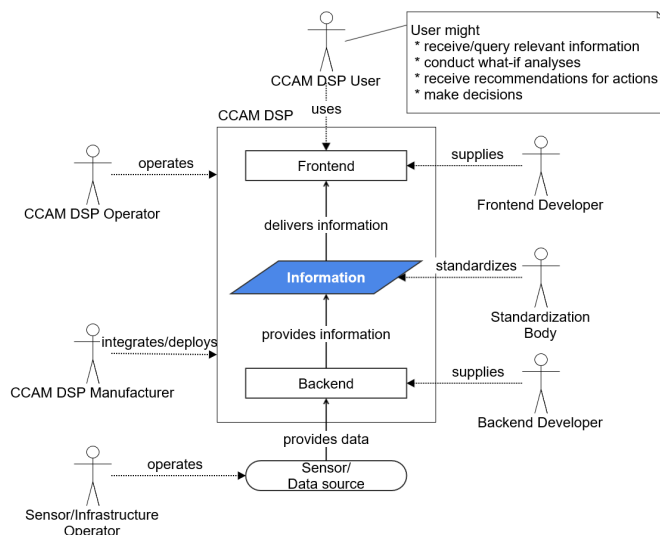


FIGURE 3: Stakeholders of a CCAM DSP.

is the de-facto standard in process and machine automation and has some properties that suit the application at hand. In the following, this statement is underpinned by checking OPC UA against the requirements in Table 4.

A01 Extensible: OPC UA information models have the capability for adding and browsing information (even at run time) and are organized in modular namespaces.

A02 Modularity and reusability of front- and backends primarily depend on the maturity of information model standards. OPC UA enables domain-specific extensions of the standard through so-called companion specifications.

A03 Distributable: Both communication paradigms employed by OPC UA (client/server and pub/sub) are inherently network-based.

A04 Flexibility: Applications from process automation range above ten million data points that are processed in second-range cycles. A recent extension of OPC UA to real-time ethernet (Time Sensitive Networking TSN) targets cycle times down to the microsecond range.

A05 Hardware-neutral: Server profiles and different vendors of SDK and tooling allow the software to be adapted to specific use cases and constraints, e.g., the Micro Embedded Device Server profile allows a downscaling to very limited computing and memory resources. Applications in machine and factory automation utilize a broad diversity of computing resources from small decentral processors to cloud computing.

RT01 Different time scales: Pub/sub, together with the more recent extension of OPC UA to deterministic ethernet (time sensitive networking TSN) enable real time applications down to sub-millisecond cycle time. OPC UA companion specifications enable the integration of various vendor-specific field buses.

RT02 Different cycle times: Asynchronous and synchronous operations are supported, as well as events.

RT03 Real time guarantees are possible if sufficient hardware, software and networking resources and technologies are provided end-to-end. OPC UA TSN can be expected to support appropriate configurations.

DS01 Robust with respect to source availability: Can be achieved by utilizing source timestamp and quality metadata.

DS02 Processing chains: Information can be written and read by concurrent processes e.g., separate backends.

S01 Authenticity: Certificate-based authentication procedures are provided

S02 Confidentiality and S03 Integrity: Read and write access can be controlled using a customizable roles scheme on a per-data-point basis.

IT01 Available and IT02 Maintainable are common requirements in factory and machine automation, for which OPC UA was designed. For example, features such as server redundancy, complemented by vendor specific network redundancy techniques, can improve availability.

F01 Interoperable: OPC UA was designed to make components and machines from different vendors replaceable and interoperable. This is mainly achieved by companion specifications that support domain-specific information models as extensions of the core standards.

F02 Information quality: Expression of age/timeliness of a data point as well as encoding of missing values are supported natively, uncertainty can be custom-modeled.

F03 Metadata: OPC UA defines a language for information modeling that allows for self-descriptive information models and expression of semantic (e.g., units, relations, ...).

As shown, OPC UA meets the above requirements in theory. In order to investigate the suitability in practice, several demonstrators were set up.

## VI. DEMONSTRATION

Within this Section, three implementations for CCAM Decision Support Platforms are presented. The first implementation is located in Austria and covers a highway section with a tunnel construction site, intending to support automated vehicles when travelling along the ODD-critical section. The second implementation is based in Germany and consists of a digital information representation of traffic data collected by the Test Bed Lower Saxony. Its two use cases are to support automated vehicles and infrastructure managers, respectively. The third implementation covers COPE<sup>4</sup> [32], a collective perception system for protecting vulnerable road users on urban intersections. It is located at an urban intersection in Hallein, Austria.

An in-depth description of each demo implementation, its use cases and a technical description of the implementation is provided in the following Sections. Fig. 4 and Table 5 provide an overview of the implementations and use-cases.

<sup>4</sup><https://www.project-cope.eu>

Note, that these implementations are proof-of-concept prototypes and are not in any way optimized for commercial deployment. The hardware specs merely indicate, that a prototype can run on consumer grade computers and achieve acceptable latencies. The algorithm complexity of a backend or frontend depends exclusively on the particular implementation. Hence, the algorithm complexity given in Table 5 reflects the complexity of the *implemented* backends in these demonstration implementations and is not to be mistaken for a general limit or target.

#### A. AUSTRIA: A10

This first demonstration covers a section of the A10 highway in Austria where a tunnel renovation is planned. The CCAM DSP operator is the highway operator and manager (ASFINAG) which, as a possible future scenario, aims to support automated vehicles as users, that pass through the construction site. A thorough analysis of relevant driving tasks, their respective anticipated demand for supplementary information, as well as the potential hazard in case of an automated driving function failure was performed. Relevant information groups that are best provided by the infrastructure were identified. These include the topography of the highway section, points of particular interest e.g., tunnel portals, lane geometry, restrictions and availability, and the applicable rules and regulations, e.g., the speed limit.

This demo implementation addresses S1 and S2 as described in Table 3 by providing additional information to vehicles. Scenarios that were previously out-of-ODD for an ADAS/AD system may now be inside-ODD.

Utilized data sources from which information is extracted are the Graphenintegrations-Plattform (GIP) data Austria, which provides open government data (quality controlled and versioned) of the Austrian road network and several content streams provided by ASFINAG, in particular the DATEX II profiles *TRAFFIC SIGNS STATIC*, *TRAFFIC SIGNS DYNAMIC*, *PLANNED EVENTS* and *UNPLANNED EVENTS*. The first two contain data of traffic signs (e.g., location, type of sign, vehicle class it applies to, numeric information about the speed limits) from which the speed limit for each vehicle class at all points of the highway can be derived. The last two streams contain data on planned construction sites and incidents, e.g., location, duration, lane blockings and physical restrictions. GIP data are updated approximately every two months and are therefore considered quasi-static data. In contrast, the content streams are updated every 15 minutes and can be considered dynamic data.

The OPC UA server is based on open62541<sup>5</sup>, an open source implementation for OPC UA Servers. A toolchain that supports information model generation in Matlab® and produces a valid information model file for compilation has been developed. Two backends are implemented that combine data from different sources, extract information, cf. Table 2, and provide the live information to the OPC UA

server via a information-specific UDP packet format. The highest algorithm complexity is  $\mathcal{O}(n)$  for the backends in this demonstration implementation.

A frontend is implemented in Matlab® that reads information from the OPC UA server and visualizes selected information in a dashboard. In a full implementation, another frontend would read information, convert it into C-ITS messages and cyclically broadcast them via road-side units to the user, i.e., the automated vehicle (omitted in the demonstration).

#### B. GERMANY: TEST BED LOWER SAXONY (TBLS) A2

The second demonstration aims to provide information for two different user groups and includes content captured by the Test Bed Lower Saxony (TBLS). The TBLS is a research infrastructure built by the German Aerospace Center (DLR) on public roads A39, A7, A2, and a number of rural roads in Lower Saxony (Germany) in 2020 [40]. It consists of physical road infrastructure (camera-based object detection and V2X RSUs), a virtual replica (models and scenarios for simulation), and a digital content catalog. The digital content catalog contains, among other sources, content provided by the Traffic Management Center (TMC) in Lower Saxony<sup>6</sup>. The content of the TMC consists of three different types: loop detector content, dynamic traffic sign content, and weather content. The demonstration use cases *Intelligent Speed Advisory*, *Traffic Volume Dashboard* and *Temperature Dashboard* as shown in Fig. 4 are implemented based on this content.

Technically, each loop detector and weather station sends a measured reality update every minute that includes a station identifier and the measurement values. The content of the dynamic traffic signs is updated when the content of the sign changes (on demand) and is also containing an identifier and payload information. A static database provides the meta information (like location) about the infrastructure points for, e.g., to geographically locate the measurement.

The OPC UA implementation for the Test Bed Lower Saxony is based on Python [41] in version 3.8. It is divided in three modules: OPC UA server, OPC UA updater (backend) and OPC UA frontend.

The OPC UA modules are based on the open-source Python library *opcua-asyncio*<sup>7</sup>. The server component consists of the data/information model and the OPC UA interfaces. The update module fetches updates via Apache Kafka, converts data into information, and stores information in the information model within the server module.

To generate the information, the incoming content is distinguished according to the perspective of the user. For example, content provided by the loop detectors is viewed from two different perspectives:

- infrastructure perspective

<sup>6</sup><https://www.vnz-niedersachsen.de/>

<sup>7</sup><https://github.com/FreeOpcUa/opcua-asyncio>

<sup>5</sup><https://www.open62541.org/>

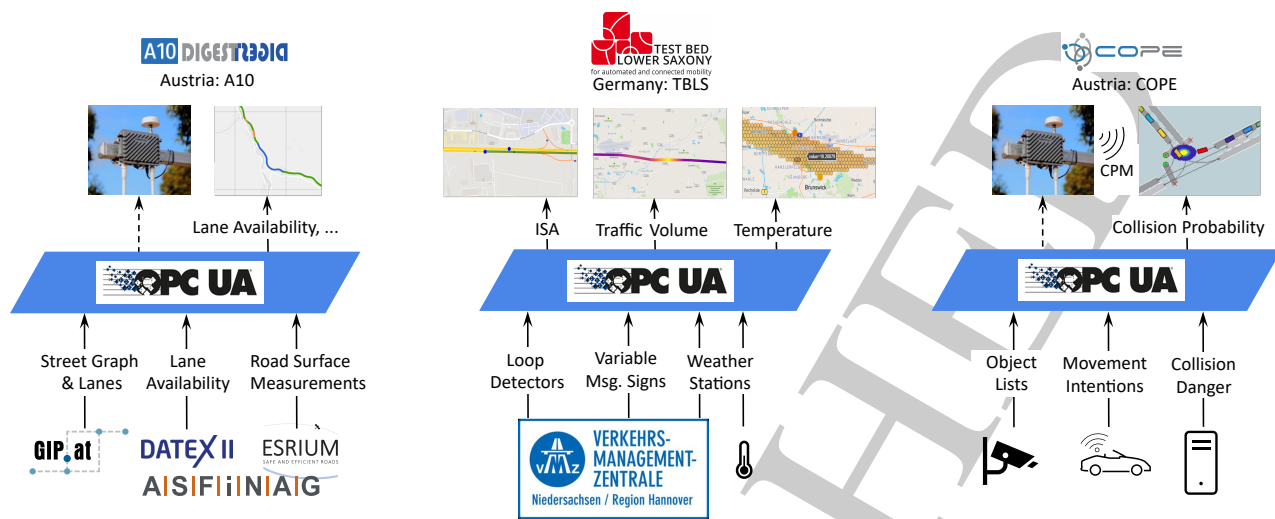


FIGURE 4: Overview of the demonstrator setups with backend data sources (bottom row), extracted information groups (text) and frontend implementation (top row)

- automated vehicle perspective

A loop detector sends a measurement update of the vehicles passed and their speed for a particular time stamp. From an infrastructure perspective, the quality of the measurement, the number of updates received in the past, and aged or missed measurements are of interest to determine the status of the infrastructure and to plan maintenance if necessary. Thus, the relevant information, such as the number of updates received in the last hour and the corresponding failure rate along the location of the loop detector, is contained in the information pool.

From the perspective of an Autonomous Vehicle (AV), e.g., the information about traffic volume along its route is of interest to determine optimal routes and velocities. Thus, it mainly addresses S1 (see Table 3) by providing additional information to vehicles. Therefore, for AVs the information about the traffic volume and speed along the course of the road is relevant rather than the single measurement values of nearby loop detectors. Hence, the measurements are modeled as two sorted arrays containing the information about the loop detector's track kilometers and the respective traffic volume.

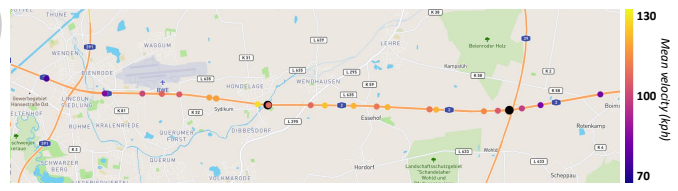
The other data sources (dynamic traffic signs and weather content) are modeled analogously from an AV and infrastructure perspective.

The frontend is realized using a dashboard visualizing the information model. To transmit the information from the OPC UA server to the frontend, the subscription mechanism of the OPC UA server is used.

Fig. 5 shows the dashboard for the loop detector data. The dashboard client allows to chose the visualization perspective of the information model (vehicle or infrastructure perspective). It provides the quantity and velocity of passenger cars, trucks, or all vehicles combined.



(a) Visualization of the vehicle perspective. The mean velocity measured by the loop detectors is displayed along the course of the road.



(b) Visualization of the infrastructure perspective. Each highlighted point shows the position of a loop detector and its respective measured mean velocity of passing vehicles.

FIGURE 5: Frontend visualization for loop detector traffic flow content. The color indicates the number of vehicles per hour.

Fig. 6 combines both perspectives into one visualization of the dynamic traffic signs. The visualization is limited to the information of the dynamic traffic signs regarding speed limits (information on e.g. the "no overtaking" sign is omitted for the prototype). The information for an AV is shown for each lane and representing the value, beginning, and end of the limitation. For simplicity, the information is not restricted to specific vehicle types. Whereas, the

TABLE 5: Overview of demonstration implementations

	Austria A10	TBLS A2	COPE
Users	Automated vehicles	Automated vehicles as well as infrastructure managers	Automated vehicles
Frontend	RSU, dashboard	RSU, dashborad	RSU, dashboard
Domain	Highway	Highway	Urban
Region	Tunnel construction site A10, Austria	Test Bed Lower Saxony A2, Germany	Hallein and Linz, Austria
Implementation	open62541, MATLAB®	FreeOpcUa, Python	open62541, MATLAB®, Python
Information groups	Topography, lane availability, POI, road surface characteristics	Traffic volume and speeds, content of variable message signs, weather information, metadata	Object list, object dynamics, movement predictions, collision risk, map
Information dynamics	≈ 15 Minutes	Seconds	≪ 1 Second
CPU for OPC UA Server	Intel(R) Xeon(R) CPU E3-1225 V2 @ 3.20GHz	Intel Xeon Gold 6126 @ 2x 2.594GHz	Intel(R) Xeon(R) CPU E3-1225 V2 @ 3.20GHz
CPU for Backends	Intel(R) Xeon(R) CPU E3-1225 V2 @ 3.20GHz	Intel Xeon Gold 6126 @ 2x 2.594GHz	Intel(R) Xeon(R) CPU E3-1225 V2 @ 3.20GHz
CPU for Frontends	Intel(R) Core(TM) i7-11850H @ 2.50GHz	Intel(R) Core(TM) i7-8665U CPU @ 1.90GHz	Intel(R) Core(TM) i7-11850H @ 2.50GHz
algorithm complexity of backend	$\mathcal{O}(n_{events})$	$\mathcal{O}(n_{events})$	$\mathcal{O}(n_{vehicles}^2)$
data to information latency	< 20s	< 10s	< 100 ms
data traffic volume	< 150 kByte/sec	< 10 kByte/sec	≈ 1.25 MByte/sec



FIGURE 6: Visualization of dynamic traffic sign information: combined vehicle and infrastructure perspective. Blue points indicate a dynamic traffic sign with its infrastructural information (e.g., last update). Continuous lines represent the allowed speed on the given lane (yellow - 100 kph speed limit, green - no limit).

information for the infrastructure perspective is displayed with its location and status.

### C. AUSTRIA: COPE - Collective Perception

The Austrian project COPE aims at protecting Vulnerable Road Users (VRU) at urban intersections by utilizing collective perception. This is a safety-relevant instance of B2, cf. Table 3, where strict requirements concerning information dynamics, latency and information quality apply.

At an urban intersection equipped with sensors (video cameras) traffic participants are detected utilizing object recognition and object tracking. In addition, V2X-enabled vehicles can provide telemetry. A backend generates and supplies information about all recognized traffic participants

(location, orientation, velocity, acceleration, type, etc.) based on sensor and tracking data. Augmenting the traffic participant list, another backend provides information about collision risk by applying behaviour models to predict future locations of traffic participants. The highest algorithm complexity is  $\mathcal{O}(n^2)$  for the backends in this demonstration implementation, where  $n$  represents the number of tracked traffic participants. A frontend was developed, based on high definition maps. All recognized traffic participant's locations are shown live, and critical participant-pairs are highlighted. The implementation of the demonstrator in COPE is based on similar technologies as the A10 demo, cf. Sec. VI.A. Due to the high information dynamics as well as the safety aspects of the use case, both communication latency and computing time were critical. It was shown that the proposed architecture is capable of meeting the real time demands and the algorithms were sufficiently quick.

### VII. CONCLUSION

The term digital twin seems to have become a projection screen for a wide variety of topics and applications. Focusing on the context of CCAM and smart road services, this work proposes a CCAM Decision Support Platform, which is a digital twin [2] in the general sense, albeit with a specific scope, crisp requirements, versatile architecture and mature technologies that enable practical implementations.

The main contributions of this work can be summarized as follows:

- An appropriate abstraction level for communication between traffic participants and smart road services is established. A set of requirements on information is proposed that facilitates the development of interoperable information models.
  - The relationship between information, ODD and ISAD is clarified. Three taxonomic strategies to utilize smart road information to support CCAM are identified.
  - The requirements on a digital twin, i.e., a CCAM DSP, for road and traffic infrastructure are analysed and formulated comprehensively. Relevant stakeholders involved in road traffic, including asset management and maintenance, traffic management and control as well as CCAM are considered.
  - An architecture for a DSP is proposed and a technological basis for its realization (OPC UA) is identified, which is capable of meeting the defined requirements.
  - The overall solution concept is validated with three different implementations and several demonstration use cases for each implementation.
- The requirements on information models proposed in this work are expected to contribute significantly to the joint effort of standardization across all stakeholder groups. In upcoming activities, the proposed requirements should be expanded and integrated into the standardization efforts.
  - The demonstrators presented show the proof-of-concept of the proposed DT architecture but do not represent optimized implementations or concrete proposals for specific applications. Future work should propose concrete, production-ready data models and implementations for specific applications.

Not all open questions have been addressed and solved with the presented approach, but the proposed architecture is considered to be a sound basis for technical realizations. Different implementations may differ significantly (e.g., tooling and SDKs, hardware and operating systems, networking and degree of distribution, real-time capabilities, security, safety relevance, redundancy). However, architecture and information modelling principles are shown to be sufficiently generic to support a broad variety of use cases. The demonstrators presented show the feasibility of the architecture, but do not represent optimized or production-ready systems.

Whereas standards for V2X messages are relatively far developed, e.g., [27], other details of frontend-to-user-communication such as, e.g., push/pull-mechanisms and efficient querying, are not generally specified. For both frontends and backends, reusability of modules increases with a growing body of harmonized standards.

Standardised information models can support the harmonized formulation of laws and regulations and build a foundation for a technology-independent description of information sources. It is critical that information modelling is done in a way that facilitates effective cooperation between infrastructure and ADAS/AD functions. A practical roll-out strategy might be to develop *partial* reference information models that are sufficient for a set of intended tasks and decisions. Such a model can be extended once additional tasks are implemented and corresponding necessary information becomes relevant. The proposed requirements on information model support the development of (partial) suitable reference models as a joint effort of involved stakeholders.

## VIII. OUTLOOK

A number of follow-up initiatives can be derived when utilizing CCAM DSP for smart road services:

In future CCAM projects, we propose that diverse CCAM DSP user groups (e.g., back-end and front-end providers, infrastructure operators) should cooperate on the topic. This encourages cooperative information modelling, standardization, the description of data quality and meta requirements on information for particular tasks, matching user expectations to frontend developer and DSP operator assumptions. In such a group aspects that remained unsolved within the proof-of-concept could be treated, i.e. evolving a modelling guideline for an effective DT with lower or higher latency demands depending of the intended range of applications or identification of possible set-ups for the communication structures and functional distribution between the frontend and the DSP users for specific applications. Furthermore, the presented demonstrators only showed the general functionality of the described approach using OPC UA for the implementation of a DSP. In future activities a comprehend approach could look at a higher variety of test bed data sources and CCAM applications in order to enhance the concept on a broader base of information. This would allow as well to further define hardware requirements in relation to information model structure and size.

In general, the task of interface standardization will play a major role for the evolution of high-level ISAD applications. Future work, such as the GAIA-X 4 Future Mobility<sup>8</sup> project family, will focus on providing a standardized service infrastructure for smart road services. The GAIA-X service layer could serve as the access point for a digital twin of a certain road section and thus, for all active CCAM services on that section. This way, an easy access to CCAM through a DSP as proposed in this paper could be implemented.

Another topic of high urgency is the definition and resolution of binding laws and regulations. This applies to both, the operation of infrastructure and the machine-readable encoding of existing laws. For the latter, a first step was taken e.g., in the lex2Vehicle project [21], but further research and development is necessary.

## ACKNOWLEDGMENT

This work was co-funded by the European Union's Horizon 2020 research and innovation program (HADRIAN, grant

<sup>8</sup><https://www.gaia-x4futuremobility.dlr.de>

number 875597) and the Austrian Federal Ministry for Climate Action, Environment, Energy, Mobility, Innovation and Technology within the "Mobilität der Zukunft" program (DIGEST, grant number 36281646).

## REFERENCES

- [1] A. Kuhn, J. Carmona, T. Novak, W. Aigner, W. Schildorfer, and D. Patz, "Test fields and advanced accompanying methods as necessity for the validation of automated driving," in *Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018, April 16-19, 2018, Vienna, Austria*, 2018.
- [2] W. Kritzingner, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, and W. Sihl, "Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, pp. 1016–1022, 2018.
- [3] A. Kuhn, G. Eibl, and T. Fasig, "Concept for an "intelligent" traffic control network," in *Proceedings of the 19th ITS World Congress Vienna, Austria, EU-00410, October 2012.*, pp. 1–12, 2012.
- [4] A. Kuhn, J. Carmona, and T. Palau, "A hierarchical, subsidiary system architecture for traffic control with connected vehicles," in *Proceedings 22nd ITS World Congress, Bordeaux, France, Paper number ITS-2199*, 2015.
- [5] L. Asbach and F. Köster, "Generating test cases from real field data to ensure c2x interoperability," in *CAR 2 CAR Forum 2019, 29.-31. Okt. 2019, Turin, Italien*, 2019.
- [6] F. Köster and M. Fischer, "Application platform for intelligent mobility (aim) and testbed lower saxony," in *12th ITS European Congress 2017, 19.-22. June 2017, Strasbourg, France*, 2017.
- [7] S. Knake-Langhorst, K. Gimm, T. Frankiewicz, and F. Köster, "Test site aim – toolbox and enabler for applied research and development in traffic and mobility," in *Transportation Research Procedia*, pp. 2197–2206, Elsevier, 2016.
- [8] I. Biederman, "On the semantics of a glance at a scene. perceptual organization. m. kubovy and jr pomerantz," 1981.
- [9] Mercedes-Benz Research & Development North America, *Introduction DRIVE PILOT: An Automated Driving System for the Highway*. Mercedes-Benz, 2019.
- [10] A. Reschka, *Fertigkeiten-und Fähigkeitengraphen als Grundlage des sicheren Betriebs von automatisierten Fahrzeugen im öffentlichen Straßenverkehr in städtischer Umgebung*. PhD thesis, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2017.
- [11] V. Mannoni, V. Berg, S. Sesia, and E. Perraud, "A comparison of the v2x communication systems: Its-g5 and c-v2x," in *2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring)*, pp. 1–5, IEEE, 2019.
- [12] M. Karoui, A. Freitas, and G. Chalhoub, "Performance comparison between lte-v2x and its-g5 under realistic urban scenarios," in *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*, pp. 1–7, IEEE, 2020.
- [13] M. Jacoby and T. Usländer, "Digital twin and internet of things—current standards landscape," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 18, p. 6519, 2020.
- [14] G. Mylonas, A. Kalogeras, G. Kalogeras, C. Anagnostopoulos, C. Alexakos, and L. Muñoz, "Digital twins from smart manufacturing to smart cities: A survey," *Ieee Access*, vol. 9, pp. 143222–143249, 2021.
- [15] S. P. Ramu, P. Boopalan, Q.-V. Pham, P. K. R. Maddikunta, T. Huynh-The, M. Alazab, T. T. Nguyen, and T. R. Gadekallu, "Federated learning enabled digital twins for smart cities: Concepts, recent advances, and future directions," *Sustainable Cities and Society*, vol. 79, p. 103663, 2022.
- [16] S. Hakak, T. R. Gadekallu, P. K. R. Maddikunta, S. P. Ramu, M. Parimala, C. De Alwis, and M. Liyanage, "Autonomous vehicles in 5g and beyond: A survey," *Vehicular Communications*, p. 100551, 2022.
- [17] V. Jirkovský, M. Obitko, O. Šebek, and P. Kadera, "Requirements for information modelling in manufacturing," in *Towards Digital Intelligence Society: A Knowledge-based Approach*, pp. 147–159, Springer, 2021.
- [18] R. L. Ackoff, "From data to wisdom," *Journal of applied systems analysis*, vol. 16, no. 1, pp. 3–9, 1989.
- [19] Inland Transport Committee, "Convention on road traffic," *United Nations Economic Commission For Europe*, 1968.
- [20] Inland Transport Committee, "Report of the sixty-eighth session of the working party on road traffic safety," *United Nations Economic Commission For Europe*, 2014.
- [21] J. Kaltwasser, D. Kleer, K. Grundei, N. Schönböck, G. Schrömmner, N. Widmann, B. Evers, K. Hagemann, D. Hermann, and B. Weinhardt, "lex2vehicle - Verkehrsrecht zum Endnutzer bringen." Confidential until approved for publication by FFG, Jan 2022.
- [22] BS PAS 1883:2020, *Operational design domain (ODD) taxonomy for an automated driving system (ADS). Specification*. London, UK: BSI Standards Limited, 2020.
- [23] M. Scholtes, L. Westhofen, L. R. Turner, K. Lotto, M. Schuldes, H. Weber, N. Wagener, C. Neurohr, M. H. Bollmann, F. Körtke, *et al.*, "6-layer model for a structured description and categorization of urban traffic and environment," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 59131–59147, 2021.
- [24] NHTSA DOT HS 812 623, *A Framework for Automated Driving System Testable Cases and Scenarios*. Washington DC: National Highway Traffic Safety Administration, 2018.
- [25] ASAM OpenSCENARIO, *ASAM OpenSCENARIO: Version 2.0.0 Concepts*. Hoehenkirchen, Germany: Association for Standardization of Automation and Measuring Systems, 2020.
- [26] ANSI/UL 4600, *Standard for Safety for the Evaluation of Autonomous Products*. UL Standards, 2020.
- [27] ETSI EN 302 637-2 V1.4, *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service*. ETSI, 2019.
- [28] N. Chomsky, "Three models for the description of language," *IRE Transactions on information theory*, vol. 2, no. 3, pp. 113–124, 1956.
- [29] A. Carreras, X. Daura, J. Erhart, and S. Ruehrup, "Eu-tp1488," *25th ITS World Congress, Copenhagen, Denmark, 17-21 September*, 2018.
- [30] J. Erhart, M. Harter, S. Rührup, S. Seebacher, and Y. Wimmer, "Infrastructure support for automated driving: Further enhancements on the isad classes in austria," *Proceedings of 8th Transport Research Arena TRA*, pp. 27–30, 2020.
- [31] J. Carmona, D. Hildenbrandt, F. Hofbauer, and M. Neubauer, *Fuel Efficiency Assessment*, pp. 143–155. Springer Nature, 2022.
- [32] A. Kuhn, M. Lauterbacher, E. Thonhofer, K. Glader, P. Luley, T. Novak, W. Aigner, and W. Schildorfer, "Projekt COPE – Collective Perception zur Vermeidung von Kollisionen und gefährlichen Situationen mittels V2X," in *Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren* (VDI Berichte, ed.), 2022.
- [33] W. Aigner, A. Kuhn, T. Palau, and J. Marczyk, "Expected systemic impacts on automated traffic from quantitative complexity rating," in *Proceedings of 25th ITS World Congress, Copenhagen, Denmark, Paper ID EU-TP1627*, 2018.
- [34] P. Lytrivis, M. Stamatis, J. Reckenzaun, S. Solmaz, R. Protzmann, A.-M. Adaktylos, Y. Wimmer, H. Atasayar, X. Daura, and D. Porcuna, "Inframix deliverable 5.4: Infrastructure classification scheme," 2020.
- [35] A. Amditis, P. Lytrivis, E. Papanikolaou, A. Carreras, and X. Daura, "Road infrastructure taxonomy for connected and automated driving," *Coop. Intell. Transp. Syst. Towards High Level Autom. Driv.*, vol. 14, pp. 309–325, 2019.
- [36] "PIARC special project "smart roads classification"," *PIARC*, 2021.
- [37] S. Ulrich, M. Leitner, C. Schwab, M. Fischer, and W. Aigner, "DIGEST Deliverable d.2: Stakeholder und Daten." Confidential until approved for publication by FFG, Nov 2020.
- [38] V. Jirkovský, P. Kadera, and M. Obitko, "Opc ua realization of cloud cyber-physical system," in *2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, pp. 115–120, IEEE, 2018.
- [39] S.-H. Leitner and W. Mahnke, "Opc ua—service-oriented architecture for industrial applications," *ABB Corporate Research Center*, vol. 48, no. 61-66, p. 22, 2006.
- [40] F. Köster, J. Mazzege, and S. Knake-Langhorst, "Automatisierte und vernetzte systeme effizient erprobt und evaluiert," *ATZextra*, vol. 23, no. 5, pp. 26–29, 2018.
- [41] G. Van Rossum and F. L. Drake Jr, *Python reference manual*. Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam, 1995.



## Informationsmodell Demonstratoren A2\_A9\_A10 NodeSet2

Als Anhang ist dieses File aus Gründen des großen Seitenumfanges nicht direkt involviert. Das File wird als Beilage zum Bericht mitgeliefert.

## **Demonstrator Testfeld Niedersachsen Informationsmodell VMZ Nodeset2**

Als Anhang ist dieses File aus Gründen des großen Seitenumfanges nicht direkt involviert. Das File wird als Beilage zum Bericht mitgeliefert.

## Demonstrator Testfeld Niedersachsen Technische Dokumentation



# AP 4 DIGEST – Technische Dokumentation DLR

Technische Dokumentation des Demonstrators zur Umsetzung des  
prototypischen digitalen Zwillings im Testfeld Niedersachsen



# Dokumenteigenschaften

Titel	<u>AP 4 DIGEST – Technische Dokumentation DLR</u>
Institut	<u>Verkehrssystemtechnik</u>
Erstellt von	<u>Fin Heuer</u>
Beteiligte	<u>Fin Heuer, Martin Fischer</u>
Datum	<u>16.12.2022</u>
Version	<u>1.0</u>
Dateiname	<u>AP4_06_Demonstrator_TFNDS_TechnischeDokumentation</u>

# Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	4
1.1. Testfeld Niedersachsen	4
2. DIGEST Demonstrator Testfeld Niedersachsen	5
2.1. Anwendungsfall	5
2.2. Technische Umsetzung des Demonstrators	6
2.2.1. VMZ Datenübertragung und -weiterverarbeitung	6
2.2.2. Implementierung des digitalen Zwillings mit OPC UA	7
2.2.3. Informationsmodell	8
2.2.4. Implementierung der OPC UA Komponenten	8
3. Zusammenfassung	13
Abbildungsverzeichnis	14
Literaturverzeichnis	15
Abkürzungsverzeichnis	16

# 1. Einleitung

Im Projekt DIGEST wurden Anforderungen an einen digitalen Zwilling erarbeitet und formuliert. Daraus wurde eine generische Architektur für digitale Zwillinge abgeleitet. Ebenfalls wurde eine technische Basis zur Umsetzung und Implementierung vorgestellt, welche die Anforderungen und die Architektur erfüllen.

In der folgenden Dokumentation wird die Umsetzung auf Basis der vorgestellten technischen Lösung eines prototypischen digitalen Zwillinges im Rahmen des Testfeld Niedersachsens dargestellt und erläutert. Zunächst wird das Testfeld Niedersachsen im Allgemeinen erläutert und danach wird auf die technischen Einzelheiten des konkreten Prototypen eingegangen.

## 1.1. Testfeld Niedersachsen

Automatisierte und vernetzte Fahrzeuge können zur Entlastung des Straßenverkehrs, zur Reduktion von Unfallzahlen und zur Steigerung des Komforts im Fahrzeug beitragen. Ebenfalls kann hierdurch die Energieeffizienz des Verkehrs verbessert, sowie negative Umweltauswirkungen reduziert werden.

Für die effiziente Entwicklung automatisierter und vernetzter Fahrzeuge sind leistungsfähige und flexible Testinfrastrukturen ein entscheidendes Werkzeug. Das Testfeld Niedersachsen<sup>1</sup> (TFNDS) bietet eine einzigartige und umfassende Kombination aus Test- und Erprobungsmöglichkeiten – von der Simulation bis hin zu Strecken im öffentlichen Raum.

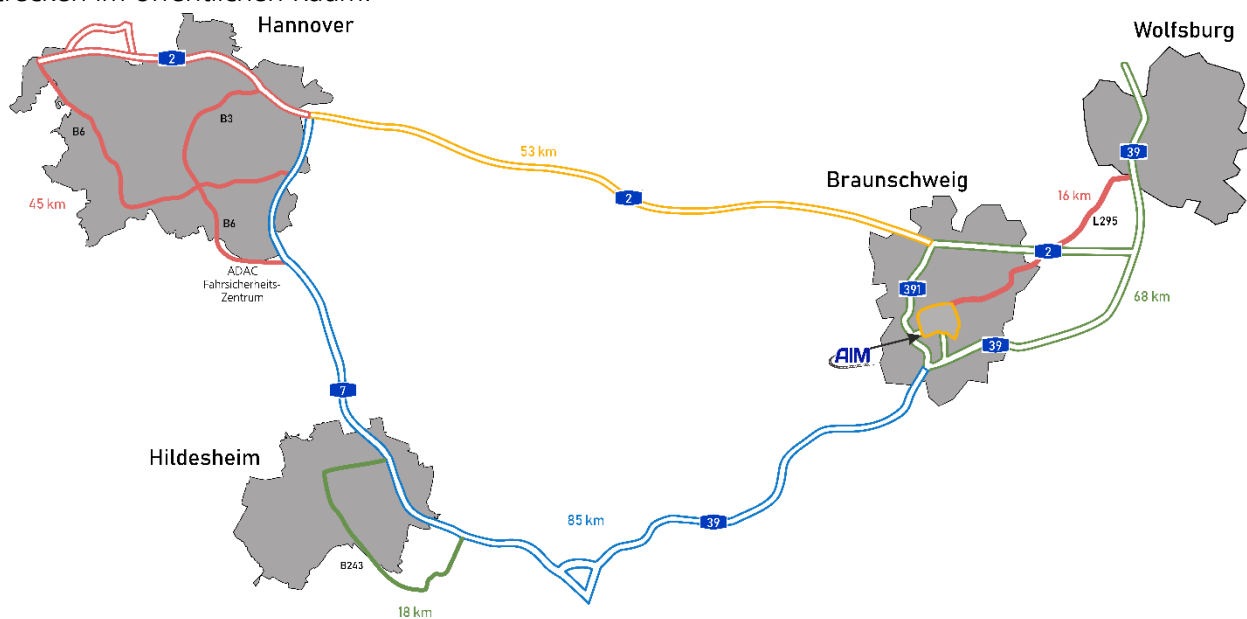


Abbildung 1: Übersicht über das gesamte Testgebiet des Testfeld Niedersachsen.

Nach dem vollständigen Aufbau wird das Testfeld Niedersachsen circa 280 Streckenkilometer umfassen (vorrangig auf Autobahnen). Es integriert zudem die etablierten Strecken aus der seit 2014 voll operativen Anwendungsplattform für Intelligente Mobilität (AIM), die in der Braunschweiger Innenstadt in Betrieb ist. So können in Niedersachsen Tests in einer Vielzahl verkehrlicher Umgebungen und Situationen durchgeführt werden.

Im Testfeld kann das Fahrverhalten und der Verkehrsfluss flexibel aus der Vogelperspektive analysiert werden, Vernetzung gestaltet oder Szenarien zur Einführung automatisierter und vernetzter Fahrzeuge simuliert

<sup>1</sup> [www.testfeld-niedersachsen.de](http://www.testfeld-niedersachsen.de)

werden. Auch die Wirksamkeit neuer Verkehrsdienste und intelligenter Infrastrukturkomponenten kann praktisch im Testfeld Niedersachsen erprobt werden.

Das TFNDS stellt verschiedene Dienste und Schnittstellen zur Verfügung. Als Basis dienen vom DLR aufgebaute Infrastrukturen, wie z.B. eine ca. 7,4 km lange Erfassungstechnik auf der Autobahn A 39 in Niedersachsen oder V2X Roadside Units im Testgebiet. Zusätzlich werden Schnittstellen zu bestehenden Infrastrukturen eingebunden und wiederum in das Gesamtsystem integriert. Ein Beispiel dafür sind Infrastrukturen der Verkehrsmanagement Zentrale (VMZ)<sup>2</sup> in Niedersachsen. Die VMZ betreibt z.B. Verkehrszählschleifen um Verkehrsflüsse und Geschwindigkeiten auf den Verkehrswegen zu beobachten und daraus Handlungen wie z.B. Anpassung der erlaubten Geschwindigkeit über Wechselverkehrszeichen durchzuführen. Die erfassten Inhalte dieser Infrastrukturen werden in das Datenökosystem des TFNDS integriert. Die Inhalte aus dem Ökosystem der VMZ dienen als Grundlage für die Umsetzung des hier vorgestellten Prototypen.

## 2. DIGEST Demonstrator Testfeld Niedersachsen

In diesem Abschnitt ist der seitens des DLR im Rahmen des Projektes DIGEST umgesetzte Demonstrator vorgestellt. Sowohl der Anwendungsfall, als auch die technische Umsetzung sind im Folgenden eingehend beschrieben.

### 2.1. Anwendungsfall

In dem hier dargestellten Anwendungsfall werden Informationen aus dem TFNDS zwei verschiedenen Nutzergruppen zur Verfügung gestellt werden. Zum einen handelt es sich dabei um automatisierte bzw. autonome Fahrzeuge und zum anderen um Infrastrukturbetreiber.

Dargestellt werden grundlegende Informationen für die Anwendungsfälle „Intelligent Speed Advisory“, „Verkehrsflussinformationen“ und „Temperaturinformationen“ (s. Abbildung 2).

Die Datengrundlage für beide Nutzergruppen stellt die gleiche Quelle dar: Inhalte der Verkehrsmanagementzentrale (VMZ) in Niedersachsen welche über das TFNDS bereitgestellt werden. Bei den Inhalten handelt es sich um Mess- und Anzeigedaten aus drei verschiedenen Infrastrukturtypen:

- Verkehrszählschleifen (Messquerschnitte)
- Wechselverkehrszeichen (Anzeigequerschnitte)
- Wetterstationen (Glättemeldeanlagen)

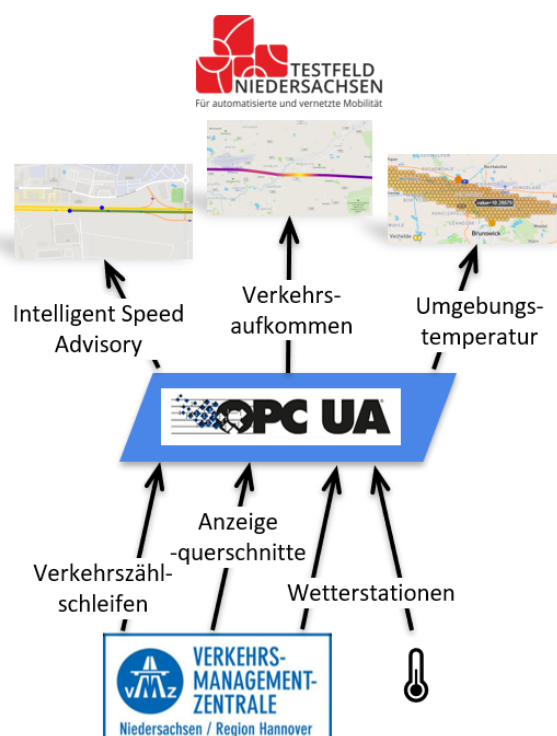


Abbildung 2: Grundsätzlicher Aufbau des DIGEST Demonstrators für das Testfeld Niedersachsen

<sup>2</sup> [www.vmz-niedersachsen.de/](http://www.vmz-niedersachsen.de/)



Abbildung 3 zeigt alle Standorte der VMZ-Infrastrukturen welche über das TFNDS bereitgestellt werden. Für den Prototypen werden die Inhalte nur auf der A2 zwischen Kreuz BS-Nord und Kreuz Wolfsburg / Königslutter ausgewertet und zur Verfügung gestellt, können aber ohne viel Aufwand auch auf die Darstellung der weiteren Datenquellen ausgeweitet werden.

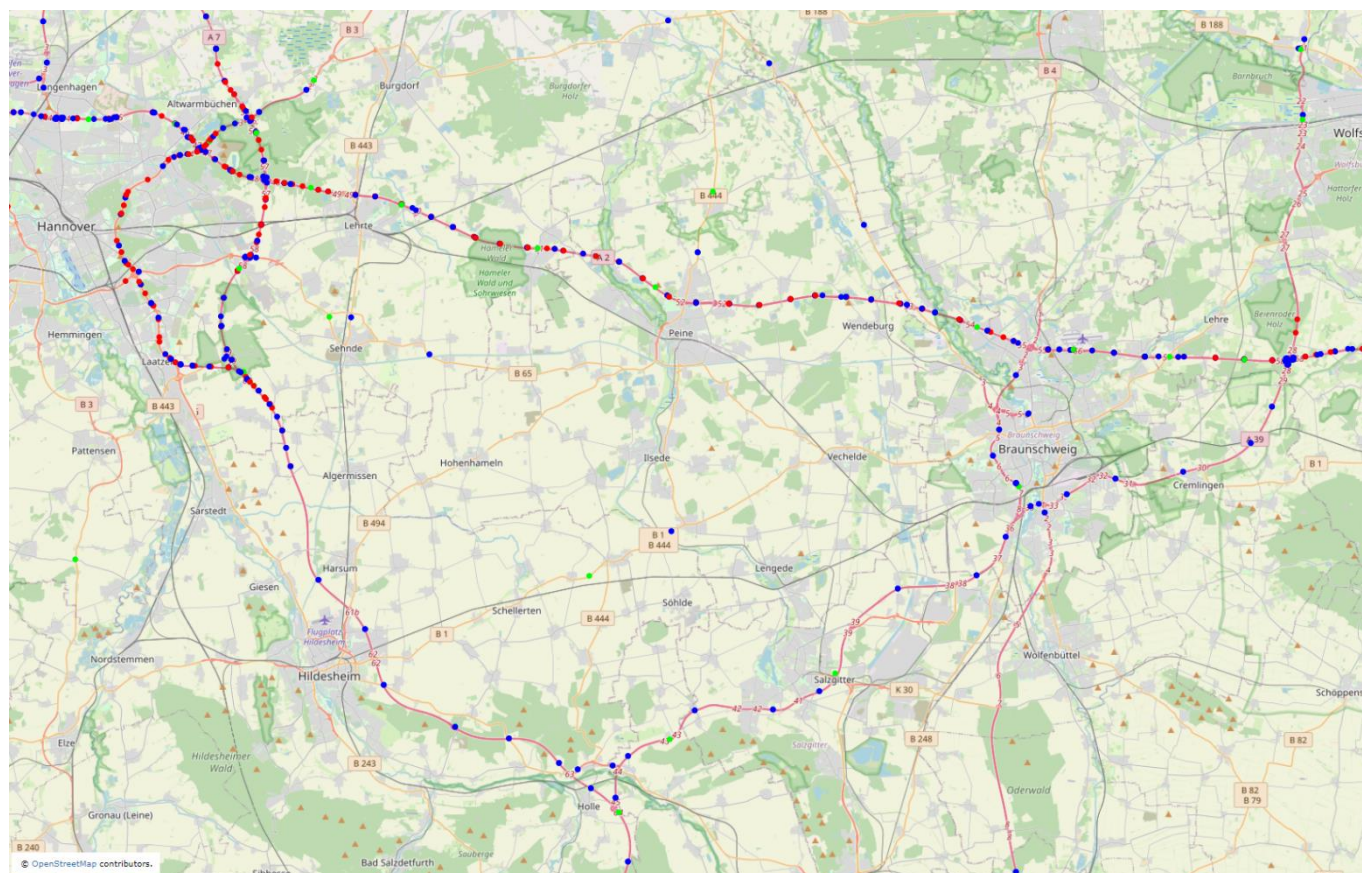


Abbildung 3: Positionen der VMZ Infrastrukturen (blau = Verkehrszählschleifen, rot = Wechselverkehrszeichen, grün = Glättemeldeanlage).

## 2.2. Technische Umsetzung des Demonstrators

Im Folgenden ist die technische Umsetzung der gewählten Anwendungsfälle beschrieben.

### 2.2.1. VMZ Datenübertragung und -weiterverarbeitung

Die im digitalen Zwilling des Testfeldes enthaltenen Informationen stammen zum Teil aus Inhalten der VMZ.

Die Inhalte aus den Verkehrszählschleifen sowie der Glättemeldeanlagen werden regelmäßig in jeder Minute gesendet. Im Kontrast dazu werden die Inhalte der Wechselverkehrszeichen nur gesendet, wenn sich der dargestellte Inhalt auf der Anzeigetafel ändert.

Die übermittelte Nachricht ist eine JSON Nachricht welche einen eindeutigen Identifier beinhaltet um die sendende Infrastruktur zu identifizieren und zusätzlich der Payload wie z.B. ein Messergebnis über die

gezählten Fahrzeuge in der letzten Minute. Um die empfangenen Inhalte zu geolokalisieren muss ein Lookup des Identifiers mit einer statischen Datenbank durchgeführt werden. Somit ist es möglich ein Messergebnis auch konkreten Strecken wie z.B. einer Autobahn zuzuordnen.

Um diese Inhalte im digitalen Zwilling zu repräsentieren und schlussendlich einem Frontend zur Verfügung zu stellen, müssen diese abgerufen werden. Dazu werden die bestehende Infrastruktur und Schnittstellen des TFNDS genutzt. Der gesamte Daten- bzw. Informationsfluss ist in Abbildung 4 dargestellt.

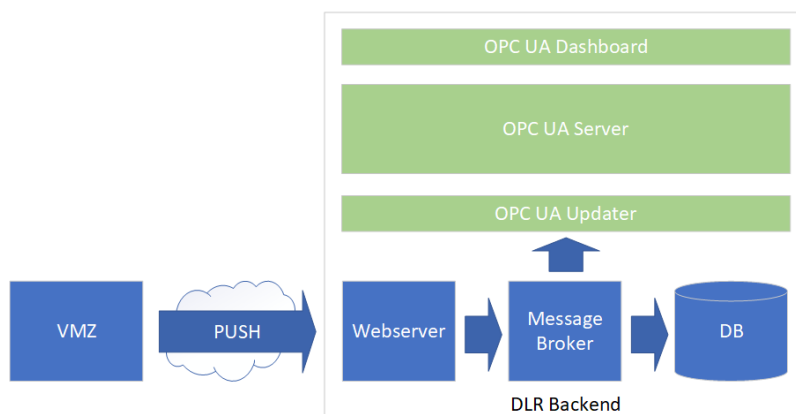


Abbildung 4: Datenfluss von der VMZ über das TFNDS hin zu Endanwender Applikationen (grün = neue Komponenten für den DIGEST Demonstrator).

Zunächst werden Inhalte der VMZ von einer Komponente bei der VMZ an einen Webserver im DLR Backend via Push gesendet. Dieser empfängt diese Inhalte, ergänzt Metadaten, und leitet das Datenpaket an einen zentralen Message Broker<sup>3</sup> weiter. Von diesem Message Broker werden verschiedene Dienste, wie z.B. bestehende V2X Dienste oder ein Datenbankdienst, bedient. Im Rahmen des Prototypen wird die OPC UA Updater Komponente an diesen zentralen Message Broker angeschlossen. Jeglicher Inhalt der VMZ (Verkehrszählschleifen, Wechselverkehrszeichen und Glättemeldeanlagen) wird über die Prozesskette abgebildet und somit im digitalen Zwilling repräsentiert.

### 2.2.2. Implementierung des digitalen Zwillings mit OPC UA

Die OPC UA Implementierung für das TFNDS ist in Python in Version 3.8 (Van Rossum, 1995) geschrieben. Dabei wird der erstellte Prototyp in die folgenden drei Komponenten unterteilt:

- OPC UA Server
- OPC UA Updater (Backend)
- OPC UA Dashboard (Frontend)

Die Basis stellt der OPC UA Server mit dem Datenmodell und den entsprechenden Informationen aus der VMZ dar. Der OPC UA Updater nutzt die bestehende TFNDS Infrastruktur um die Inhalte der VMZ zu empfangen diese in Informationen umzuwandeln und in das Informationsmodell des Servers einzupflegen. Beim OPC UA

<sup>3</sup> <https://kafka.apache.org/>

Dashboard handelt es sich um eine Visualisierung als HTML Website welche im Browser einem Nutzer präsentiert wird.

In den folgenden Abschnitten wird auf die Einzelheiten der technischen Implementierung der einzelnen Komponenten und Informationen eingegangen.

### 2.2.3. Informationsmodell

Im Rahmen des Prototypen wird das Informationsmodell in einem Semi-Automatischen Prozess erstellt. Im ersten manuellen Schritt werden dabei die grundlegenden Datentypen und -struktur angelegt. Dazu wird das ebenfalls Open-Source verfügbare Tool „opcua-modeler“<sup>4</sup> verwendet. Dies ermöglicht über eine grafische Oberfläche die Editierung des Informationsmodells und Erstellung der Datentypen. Die Oberfläche ist in Abbildung 5 dargestellt. Mit Hilfe dieser grafischen Oberfläche werden zunächst die grundsätzlichen Datentypen wie z.B. Infrastrukturpunkte (für die Infrastrukturperspektive) oder Streckenabschnitte (für die Fahrzeugperspektive) angelegt. Außerdem wird der Hauptknoten der Beispielsstrecke (A2) in diesem manuellen Prozessschritt im Informationsmodell hinterlegt. Anschließend werden die erstellten Datentypen benutzt um basierend auf bestehenden Datenbanken die jeden einzelnen Infrastrukturpunkt anzulegen und die Fahrzeugperspektive entlang der Strecke zu modellieren.

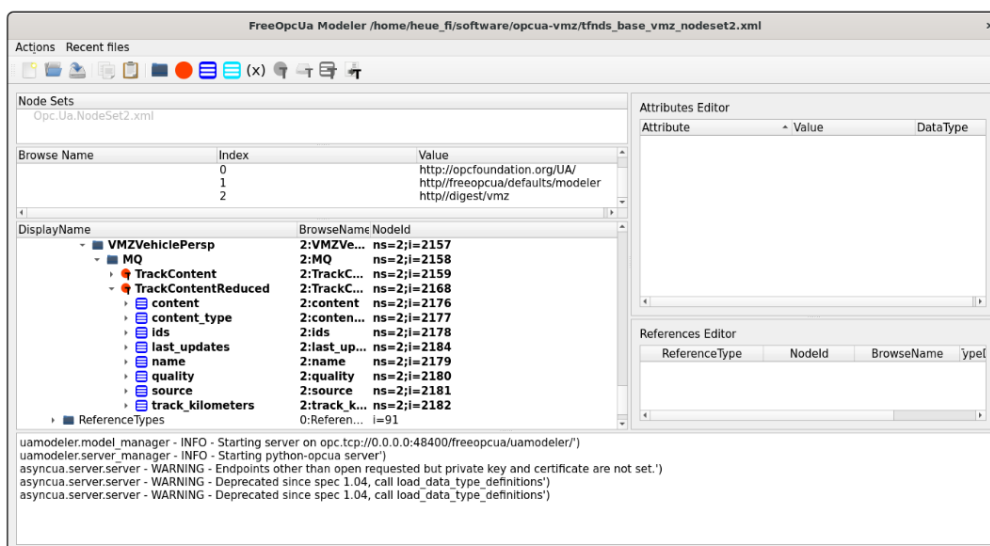


Abbildung 5: FreeOpcUa Modeler welcher verwendet wurde um die Grundstruktur des Datenmodells anzulegen.

### 2.2.4. Implementierung der OPC UA Komponenten

Alle drei OPC UA Komponenten (Server, Updater und Dashboard) sind mit Hilfe der Open-Source Python Bibliothek „opcua-asyncio“<sup>5</sup> implementiert. Die Server Komponente besteht dabei aus dem Informationsmodell und den OPC UA Schnittstellen um mit Clients zu interagieren. Die Update Komponente benutzt zusätzlich die Bibliothek „kafka-python“<sup>6</sup> um mit dem zentralen Message Broker zu interagieren. Dabei ist eine zentrale Aufgabe dieser Komponente den empfangenen Inhalt der VMZ

<sup>4</sup> <https://github.com/FreeOpcUa/opcu-modeler>

<sup>5</sup> <https://github.com/FreeOpcUa/opcu-asyncio>

<sup>6</sup> <https://kafka-python.readthedocs.io/>

in Informationen zu übersetzen. D.h., dass z.B. die Daten welche den aktuellen Zustand eines Wechselverkehrszeichen zeigen in eine Repräsentation übersetzt werden welche eine Geschwindigkeitsbegrenzung beschreiben mit den zusätzlichen Attributen von wo bis wo dies gültig ist und zu welcher Spur diese Begrenzung gehört. Zur Umwandlung der Inhalte in Informationen wird dabei zwischen den zwei Perspektiven / Nutzergruppen unterschieden:

- Infrastrukturperspektive
- Fahrzeugperspektive

Dabei werden jeweils separate Teile des Informationsmodells angesprochen. Im Folgenden wird die Notwendigkeit der unterschiedlichen Teile anhand des Beispiels der Verkehrszählschleifen erklärt. Eine Verkehrszählschleife sendet z.B. eine Messung über wie viele Fahrzeuge zu welchem Zeitpunkt mit welcher Geschwindigkeit an einem bestimmten Ort gefahren sind. Für die Infrastrukturperspektive bzw. einem Infrastrukturbetreiber ist z.B. die Qualität der Messung, die Anzahl der empfangenen Messungen in einem bestimmten Zeitintervall oder ausgebliebene Messungen und somit ein Fehlerzustand der Infrastruktur von Interesse. Somit sind die relevanten Informationen für diese Nutzergruppe wie hoch die Fehlerrate oder die Anzahl an ausgebliebene Messungen sind in Kombination mit der Position der Infrastruktur. Aus diesem Grund werden in einem Teil des Informationsmodells exakt diese Informationen abgelegt.

Für die Fahrzeugperspektive ist dahingehend die Information über den Verkehrsfluss entlang seiner Strecke von Interesse. Daher ist die relevante Information der Verkehrsfluss und Geschwindigkeit im Streckenkoordinatensystem um möglichst effizient dies z.B. bei der Routenplanung zu berücksichtigen. Wenn die Informationen aus der Infrastrukturperspektive genutzt werden würde (2D Position), müsste z.B. ein Map-Matching dieser Position zur Strecke erfolgen und es ist möglich, dass diese konkrete Verkehrszählschleife gar nicht auf seiner Route liegt. Somit ist für einen effizienten eine andere Perspektive notwendig. Für die Umsetzung werden zwei sortierte Listen für eine Strecke (bzw. Spur) benutzt welche die Informationen enthalten. Eine Liste speichert dabei die Positionen im eindimensionalen Streckenkoordinatensystem (Streckenkilometer) und die andere den passenden Wert an dieser Stelle. Somit ist auch eine einfache Interpolation der Information über die gesamte Strecke möglich. Mit dieser Repräsentation der Information kann ein Fahrzeug effizient seine Fahraufgabe erledigen. Die Inhalte der anderen Infrastrukturen der VMZ (Wechselverkehrszeichen und Glättemeldeanlagen) werden analog zu diesem Prinzip modelliert und in verschiedenen Teilen des Informationsmodells für alle Nutzergruppen abgelegt. Abschließend werden die transformierten Informationen im Informationsmodell des OPC UA Servers mit Hilfe der opcua-asyncio Bibliothek gespeichert.

In Abbildung 6 ist ein Ausschnitt des finalen Informationsmodells des laufenden OPC UA Servers mit Hilfe der „FreeOpcUA Client GUI“<sup>7</sup> dargestellt.

---

<sup>7</sup> <https://github.com/FreeOpcUa/opcua-client-gui>

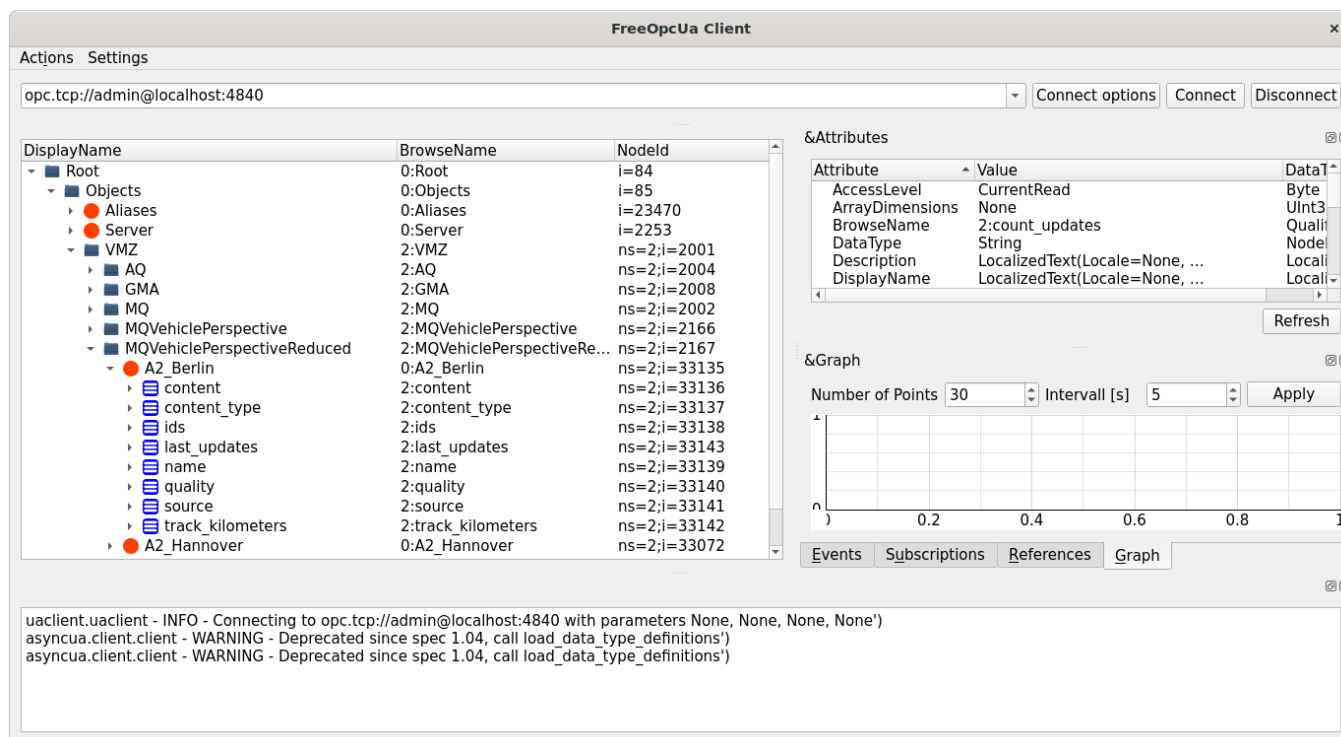


Abbildung 6: FreeOPC UA Client welcher zum OPC UA Server verbunden ist und das erstellte Informationsmodell für die VMZ Inhalte darstellt.

Das Dashboard bzw. Frontend ist implementiert mit Hilfe der Plotting Bibliothek „plotly“<sup>8</sup> und „dash“<sup>9</sup>. Zur Visualisierung, Geolokalisierung und Interpolation wurden die Bibliotheken „shapely“<sup>10</sup>, „pygeos“<sup>11</sup> und „pyproj“<sup>12</sup>. Das Dashboard greift dabei die Informationen aus dem Informationsmodells des OPC UA Servers mit Hilfe des Subscribe Mechanismus ab.

Abbildung 7 zeigt das Dashboard für die Verkehrszählschleifen aus der Infrastrukturperspektive. Dabei werden die Infrastrukturen auf einer Karte dargestellt und farblich ihr Zustand angezeigt (Messwerte werden mit Hilfe einer kontinuierlichen Skala angezeigt und falls eine Störung oder ausgebliebener Wert vorkommt wird die Infrastruktur schwarz dargestellt). Wenn die Maus über den Punkt der Infrastruktur gefahren wird, werden die relevanten Informationen für den Infrastrukturbetreiber dargestellt.

<sup>8</sup> <https://plotly.com/python/>

<sup>9</sup> <https://dash.plotly.com/>

<sup>10</sup> <https://github.com/benedekrozemberczki/shapely>

<sup>11</sup> <https://github.com/pygeos/pygeos>

<sup>12</sup> <https://github.com/pyproj4/pyproj>

[DIGEST] OPC UA - VMZ Data View

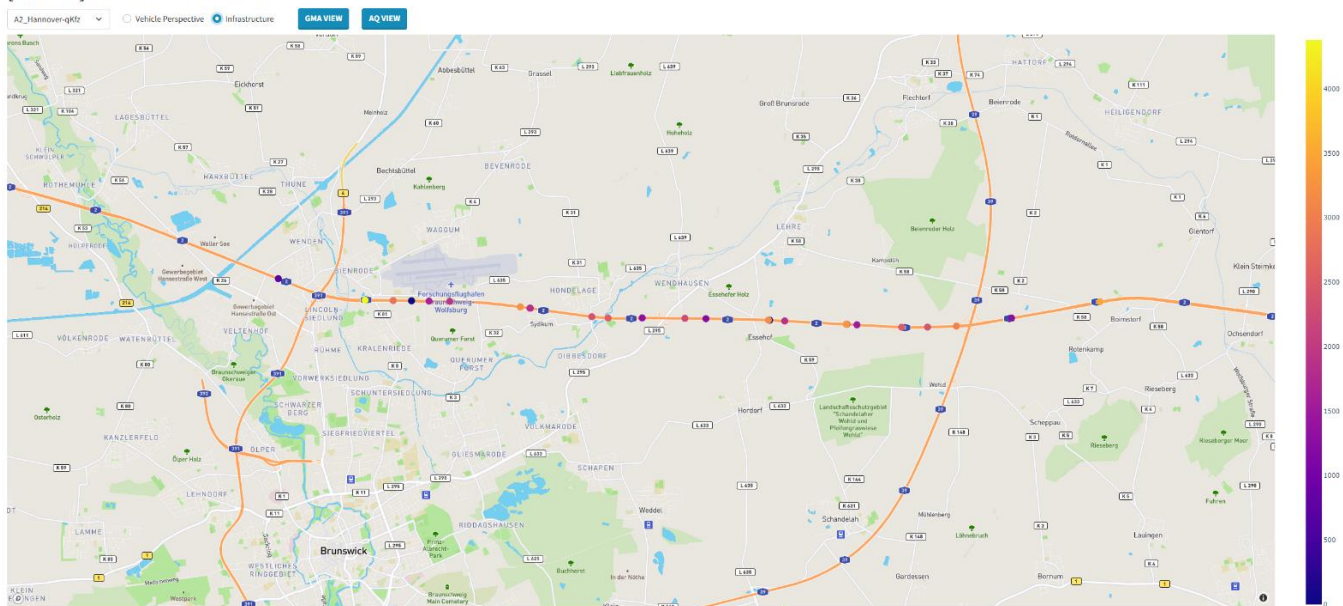


Abbildung 7: Visualisierung der Infrastrukturperspektive der Verkehrszählschleifen Informationen. Jeder hervorgehobene Punkt stellt die Position einer Verkehrszählschleife dar.

In Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. wird die Fahrzeugperspektive für die Verkehrszählschleifen dargestellt.

[DIGEST] OPC UA - VMZ Data View

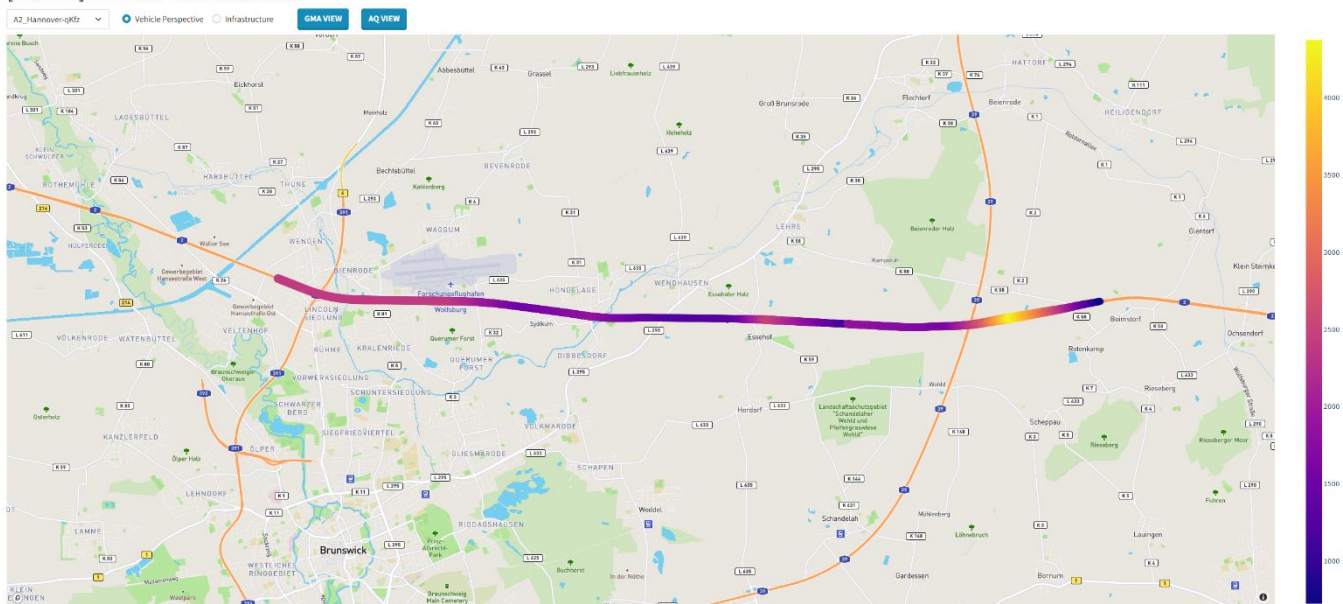


Abbildung 8: Visualisierung der Fahrzeugperspektive der Verkehrszählschleifen Informationen. Dabei wird hier die Anzahl der gemessenen Fahrzeuge pro Stunde entlang der Strecke dargestellt.

Dabei lässt sich über Auswahllisten noch die dargestellte Information noch anpassen. So kann über eine Auswahlliste z.B. die Information über den Verkehrsfluss oder Geschwindigkeit ausgewählt werden. Und über eine andere die Fahrzeugkategorie (z.B. alle oder nur PKW, LKW). Zur Verdeutlichung der Information

werden dabei die zwei Listen im Informationsmodell als interpolierte Linie auf der Karte dargestellt, da diese Information trivial aus dem Informationsmodell berechnet werden kann (im Gegensatz zur 2D Darstellung von Messpunkten).

Dabei ist zu beachten, dass beide Visualisierungen (Abbildung 7 und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) unterschiedliche Informationen (und -modellteile) darstellen basierend auf den gleichen Inhalten der VMZ. Dies soll verdeutlichen wie unterschiedliche Perspektive unterschiedliche Informationen abhängig von der Anwendung benötigen.

In Abbildung 9 werden die extrahierten Informationen aus den Inhalten der Wechselverkehrszeichen dargestellt. Dabei werden beide Perspektiven in einer Darstellung kombiniert (Punkte für die Infrastrukturperspektive und die lineare Darstellung für die Fahrzeugperspektive). Dabei wird in dieser Darstellung lediglich der Inhalt der Wechselverkehrszeichen bezüglich Geschwindigkeitslimitierungen im Rahmen des Prototypen dargestellt. Die Informationen für ein Fahrzeug wird für jede Fahrspur dargestellt und durch den Wert (farblich dargestellt) den Anfang und das Ende dieser Begrenzung dargestellt. Zur Einfachheit wird die Geschwindigkeitsbegrenzung nicht für jeden Fahrzeugtype einzeln betrachtet. Hingegen für die Infrastrukturperspektive wird die Position und Statusinformation durch ein platzieren der Maus über dem Punkt für sichtbar.

[DIGEST] OPC UA - VMZ Data View

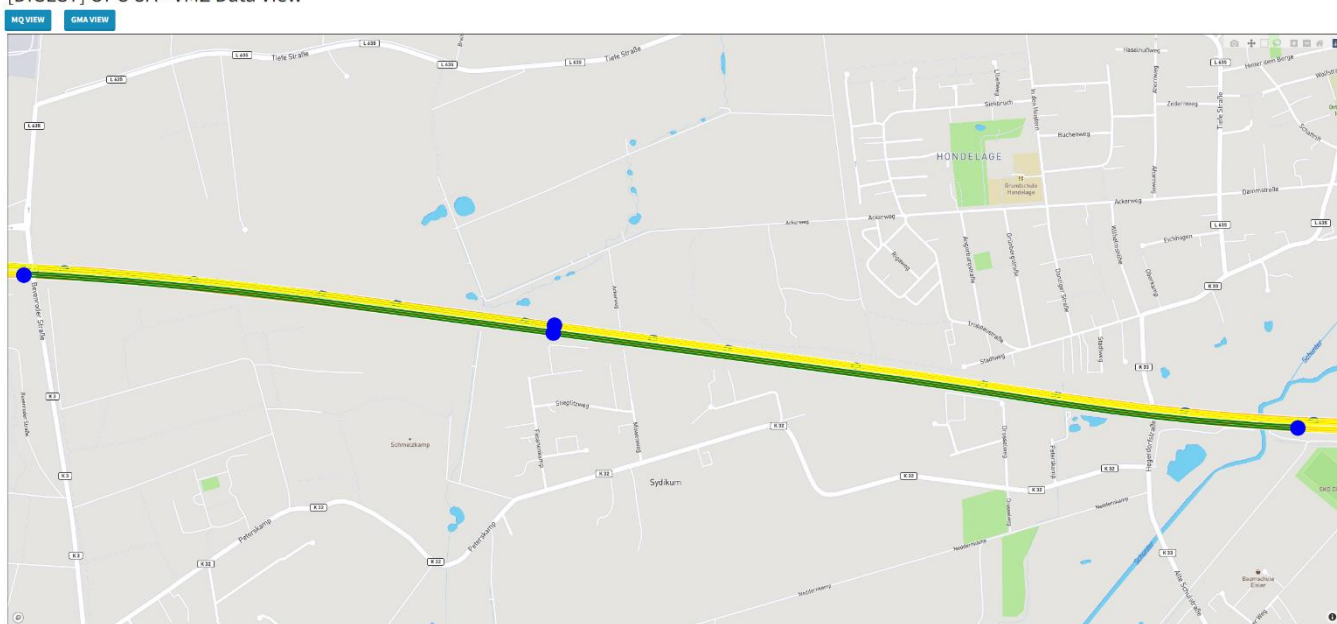


Abbildung 9: Dashboard-Visualisierung der Wechselverkehrszeichen. Fahrzeug- und Infrastrukturinformationen sind in einer Darstellung kombiniert. Blaue Punkte zeigen ein Wechselverkehrszeichen mit seinen Infrastrukturinformationen (wie Informationen über die letzte Aktualisierung) an. Die durchgehenden Linien stellen die zulässige Geschwindigkeit auf der jeweiligen Fahrspur dar (die Farbe gibt das Tempolimit an: gelb 100 km/h und grün kein Limit).

Abbildung 10 stellt die Information über den Temperaturverlauf extrahiert aus den Glättemeldeanlagen ebenfalls in einer kombinierten Visualisierung dar. Die Punkte stellen ebenfalls konkrete Infrastrukturen dar,

bei denen sich durch ein Platzieren der Maus über diesem Punkt die Infrastrukturinformationen anzeigen lassen. Darüber hinaus wird hier als zweidimensionale Array die Temperaturen dargestellt. Die Idee hinter diese Darstellung ist, dass hier eine weitere Perspektive mit eingebracht wird: „flächendeckende Temperaturinformationen“. Aus gewissen Stützstellen von Informationen lässt sich eine interpolierte Matrix an Informationen generieren. Diese ermöglicht z.B. die Erstellung eines Informationsmodells für die Fahrzeugperspektive an Orten ohne Infrastrukturausrüstung. So lässt sich z.B. aus dieser Matrix ein Spuregebundener Temperaturverlauf für beliebige Strecken innerhalb der Stützstellen berechnen.

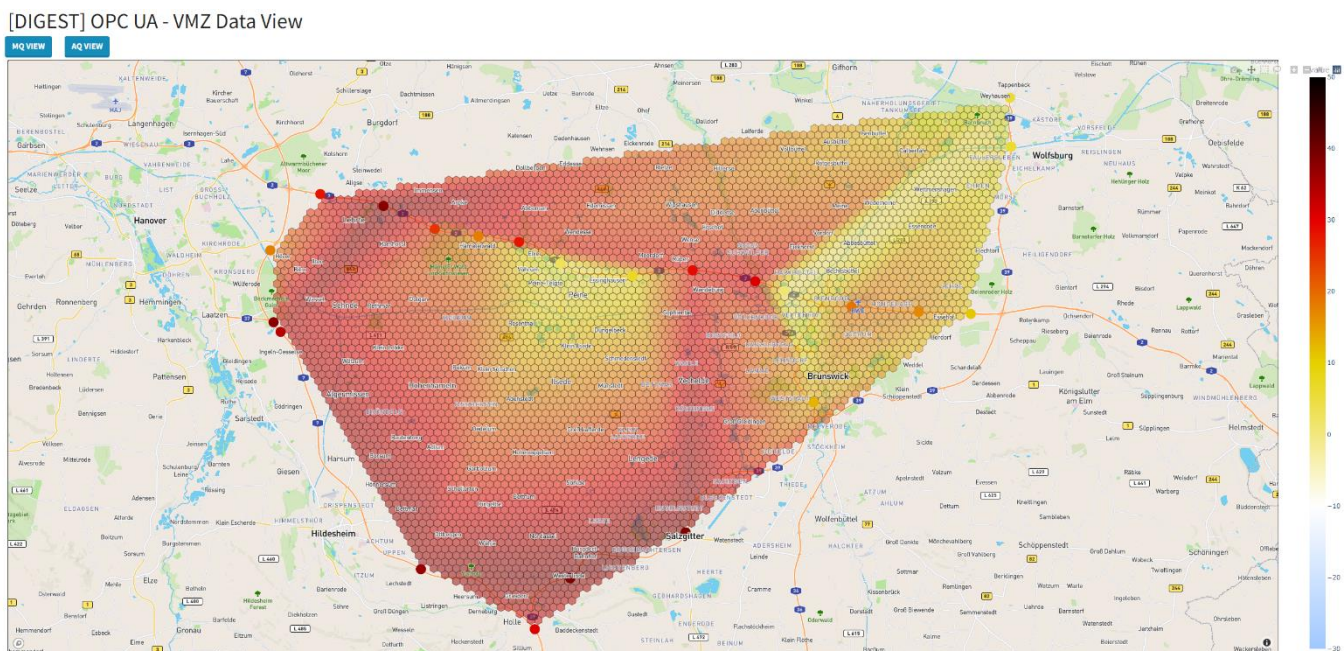


Abbildung 10: Frontend visualization of the weather data. This visualization combines both information models within one representation. The points indicate a measurement station with its infrastructural information. The inner region represents the interpolation of the temperature information.

### 3. Zusammenfassung

Das DLR hat das erarbeitete Konzept in Abstimmung mit ANDATA diskutiert und in verschiedenen Gedankenexperimenten exemplarisch angewendet. Im Rahmen des in diesem Dokument beschriebenen Demonstrators hat das DLR das Konzept als Prototypen implementiert. Der Prototyp benutzt Daten aus dem Testfeld Niedersachsen und modelliert diese im internen Strukturmodell des OPC UA Servers auf Informationsebene. Über einen entwickelten Konnektor zur bestehenden Infrastruktur werden die Daten abgerufen, zu Informationen verarbeitet und im Server gespeichert. Zur Demonstration wurden verschiedene Frontend Visualisierung erstellt, welche die enthaltene Information darstellen.

Die Vielfältigkeit und Anwendbarkeit des Konzepts konnte durch die Modellierung verschiedener Perspektiven bzw. Anwendersichten demonstriert werden. Über die Verwendung unterschiedlicher Open Source Lösungen für die Implementierung des Informationsmodells beim DLR (Python) und ANDATA (Matlab) für unterschiedliche Anwendungsfälle, konnte das DIGEST Architekturkonzepts des Digitalen Zwillings validiert und positiv evaluiert werden.



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht über das gesamte Testgebiet des Testfeld Niedersachsen.....	4
Abbildung 2: Grundsätzlicher Aufbau des DIGEST Demonstrators für das Testfeld Niedersachsen .....	5
Abbildung 3: Positionen der VMZ Infrastrukturen (blau = Verkehrszählschleifen, rot = Wechselverkehrszeichen, grün = Glättemeldeanlage).....	6
Abbildung 4: Datenfluss von der VMZ über das TFNDS hin zu Endanwender Applikationen (grün = neue Komponenten für den DIGEST Demonstrator).....	7
Abbildung 5: FreeOpcUa Modeler welcher verwendet wurde um die Grundstruktur des Datenmodells anzulegen. ....	8
Abbildung 6: FreeOPC UA Client welcher zum OPC UA Server verbunden ist und das erstellte Informationsmodell für die VMZ Inhalte darstellt.....	10
Abbildung 7: Visualisierung der Infrastrukturperspektive der Verkehrszählschleifen Informationen. Jeder hervorgehobene Punkt stellt die Position einer Verkehrszählschleife dar.....	11
Abbildung 8: Visualisierung der Fahrzeugperspektive der Verkehrszählschleifen Informationen. Dabei wird hier die Anzahl der gemessenen Fahrzeuge pro Stunde entlang der Strecke dargestellt. ....	11
Abbildung 9: Dashboard-Visualisierung der Wechselverkehrszeichen. Fahrzeug- und Infrastrukturinformationen sind in einer Darstellung kombiniert. Blaue Punkte zeigen ein Wechselverkehrszeichen mit seinen Infrastrukturinformationen (wie Informationen über die letzte Aktualisierung) an. Die durchgehenden Linien stellen die zulässige Geschwindigkeit auf der jeweiligen Fahrspur dar (die Farbe gibt das Tempolimit an: gelb 100 km/h und grün kein Limit).....	12
Abbildung 10: Frontend visualization of the weather data. This visualization combines both information models within one representation. The points indicate a measurement station with its infrastructural information. The inner region represents the interpolation of the temperature information.....	13

## Literaturverzeichnis

Van Rossum, G. a. (1995). *Python reference manual*. Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam.

## Abkürzungsverzeichnis

### **A**

AIM *Anwendungsplattform für Intelligente Mobilität*

### **T**

TFNDS *Testfeld Niedersachsen*

### **V**


VMZ *Verkehrsmanagementzentrale*

## CCAM Decision Support Platform Non-Paper (Englisch)


# CCAM Decision Support Platform (Non-Paper)

Created under the VIF D-A-CH projects DIGEST, Lex2Vehicle, Symul8

Funded by:

 Bundesministerium  
Klimaschutz, Umwelt,  
Energie, Mobilität,  
Innovation und Technologie

 Bundesministerium  
für Digitales  
und Verkehr

 Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

**Bundesamt für Strassen ASTRA**

**A|S|I|F|i|N|A|I|G**

**bast**  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Version: V10, final

Date: November 2022

Authors: Wolfgang Schildorfer (FH OÖ – Logistikum, Projekt DIGEST)  
Matthias Neubauer (FH OÖ – Logistikum, Projekt DIGEST)  
Walter Aigner (HiTec, Projekt DIGEST)  
Andreas Kuhn (ANDATA, Projekt DIGEST)  
Martin Fischer (DLR, Projekt DIGEST)  
Sandra Ulrich (consu, Projekt DIGEST)  
Nik Widmann (Prisma Solutions, Projekt Lex2Vehicle)  
Michael Haberl (TU Graz, Projekt Symul8)

## CCAM Decision Support Platform

In Germany, Austria and Switzerland, research projects in the field of transport infrastructure research have been assigned and carried out for many years. In the D-A-CH cooperation on traffic infrastructure research - 5th call (2020), projects on the topic of "automation" could be submitted in the following areas: (1) traffic simulation to adapt traffic rules, (2) digital twin of the road traffic system and (3) digitization of traffic law arrangements.

This **non-paper summarizes the results** of the three projects submitted, approved and implemented in response to the above tender: **SYMUL8** (response to 1-traffic simulation to adapt traffic rules), **DIGEST** (response to 2-digital twin of the traffic system road) and **LEX2VEHICLE** (response to 3- digitization of traffic law arrangements). The three projects run from September 1st, 2020 to September 30th, 2022. The document was created by Wolfgang Schildorfer (Project Manager DIGEST).

The **DIGEST** project demonstrated how road operators can be effectively supported for traffic management challenges in general and cooperative and automated driving challenges in particular. For this purpose, an information model was developed on the basis of an IT architecture (OPC UA) that is already being used commercially in an industrial context. The principles of the model can also be extended to other subject areas, such as asset management. The concept developed in **DIGEST** is referred to as the **CCAM Decision Support Platform**.

The **information model** developed in DIGEST (basis: DIKW model - data, information, knowledge, wisdom) as an advanced form of information management makes a significant contribution to the depiction of a homogeneous overall picture of the current traffic situation and road condition. Furthermore, this picture serves as the basis for decision-making in the road operator departments for cooperative mobility, traffic management.

The organizational complexity of the topic of "automated and connected driving" results primarily from the fact that the efficient and effective introduction can no longer be implemented by individual companies and organizations alone. In particular, there is a need for **increased, cooperative and complementary cooperation** in development and operation between automobile manufacturers, road operators and public administration, technology providers and new information service providers.

This **cooperation** will most likely **change dynamically** in the coming years. Different technologies and new services will probably have different cost profiles and advantages and disadvantages in the context of a deployment - if rapidly increasing vehicle rates and management decisions based on them are to be digitally supported. From the point of view of a road operator, the question of "the best" cooperation decision and "the investment decision that is advantageous in the technology cycle" probably arises several times. In the anticipated dynamic of knowledge, no actor can retreat to the role of a buyer; own knowledge of concepts, advantages and disadvantages and the next "turning points" in the ramp-up and the associated costs must be dynamically built up and readjusted by several or perhaps even all competent cooperation partners. The role of the D-A-CH region and its key stakeholders in this topic could be further strengthened and consolidated.

In the DIGEST project, **high interest from selected OEM stakeholder representatives** in the CCAM Decision Support Platform and the use cases ODD extension through infrastructure support (cf. ODD restrictions of

the Mercedes Drive Pilot), Intelligent Speed Advisory and Collective Perception could be identified and **first appointments with OEM representatives** were held.

DIGEST and the developed **CCAM Decision Support Platform** form the superstructure of the three D-A-CH projects. The following image shows the concept of the CCAM Decision Support Platform. Information from the different backend modules (data sources such as GIP, ASFINAG Datex-II data streams, road surface condition data from the EU project [ESRIUM](#), local traffic simulation data such as from the Symul8 project, legal information such as regulations from the Lex2Vehicle project, etc.) are stored in the CCAM Platform integrated and used as a source of various frontends (e.g. C-ITS message provision of infrastructure providers, dashboards as a basis for traffic management decisions or internal asset management decisions) depending on the required application. **The technical basis is OPC UA** (Open Platform Communications Unified Architecture). OPC UA is an industry-proven standard for data exchange as a platform-independent, service-oriented architecture (SOA). OPC UA already provides all the necessary basic mechanisms for data and information exchange (information modeling, validity management, rights management, access controls, etc.). In the demonstration phase, OPC UA has proven to be suitable for mapping different use cases with various information requirements, different data sources (backends) and data output options (frontends).

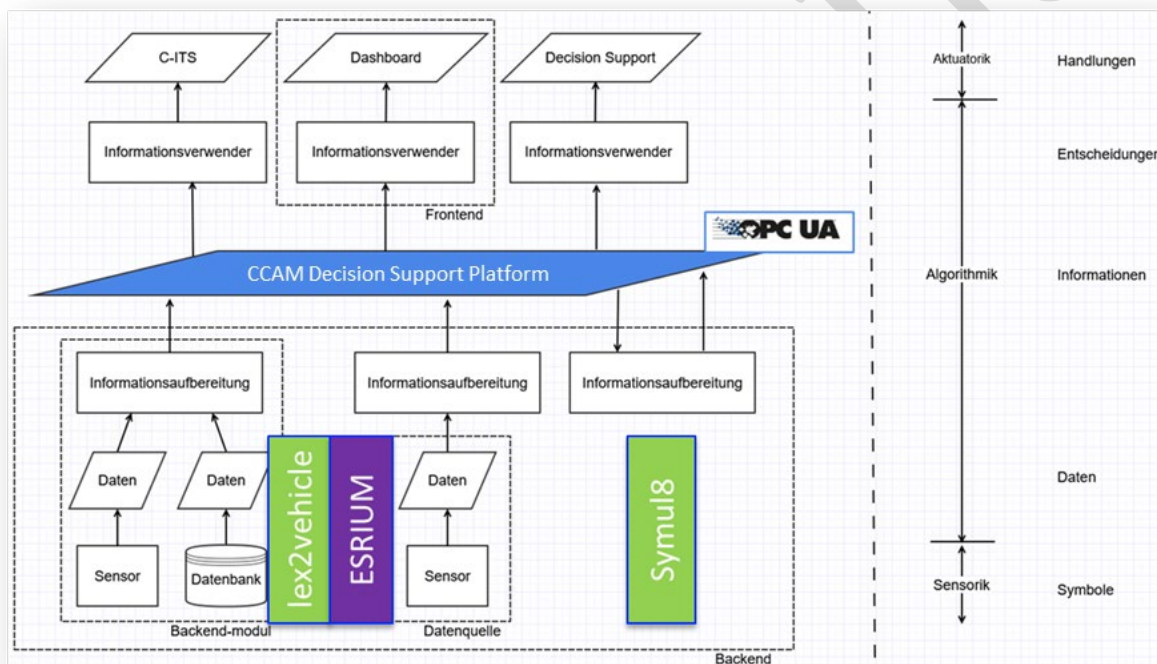


Figure 1 – CCAM Decision Support Platform information model and architecture including OPC UA approach

For every human road user, it should be as clear as possible at any point in the road network at any time and in any situation what they are allowed to do and what not. In a figurative sense, this also applies to every automated driving system. In order for this to become a reality, very fundamental considerations must be made, such as a new type of publication of road traffic laws that is digital and optimized for machine processing. The result of the [Lex2Vehicle](#) project is a documentation in which the necessary content, organizational and technical framework conditions and structures of a formulation of road traffic law adapted to the requirements of automated vehicles as well as the technical standardization of communication and

interpretation are laid down. It shows how road traffic law can meet the existing and future requirements of digitization and how it defines the scope for action for human road users and automated vehicles alike or communicates it to specific target groups.

In addition to the technological and organizational developments of automated vehicles, necessary changes and an adjustment of the traffic regulations for automated driving, especially in mixed traffic, must also be considered. Here, simulation models offer the opportunity to put the effects of different legal frameworks, traffic regulations, vehicle driving behavior and infrastructure conditions in context, to model and to evaluate them. In the [Symul8](#) project, a simulation platform consisting of the two established simulation models PTV VISSIM and SUMO was created, with which the effects of future automated driving functions on traffic efficiency and safety can be evaluated in the early development phase of automated driving functions. With the approach of the modular simulation platform, Symul8 addresses vehicle developers, road and infrastructure operators as well as traffic planners and enables a wide range of applications.

### Important insights and questions for a CCAM Decision Support Platform

The results of the three projects DIGEST, Symul8 and Lex2Vehicle underpin the original objective of the 2020 call for proposals, the core of which is presented below.

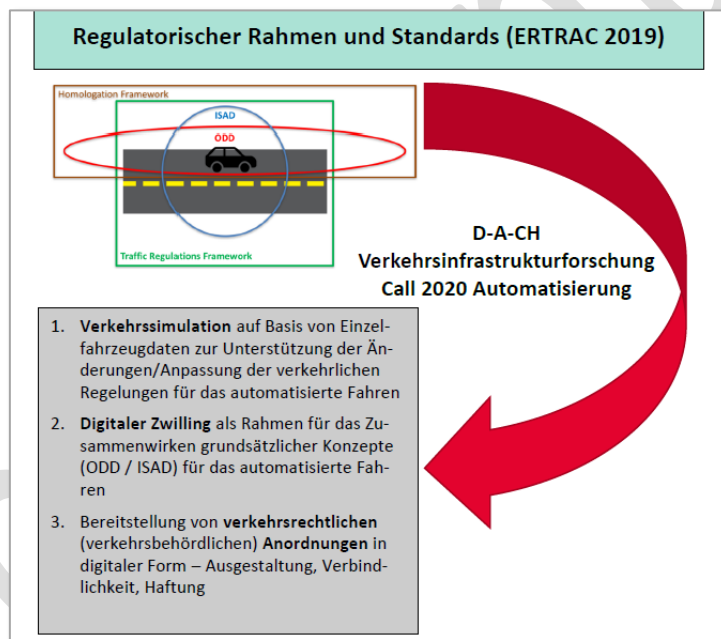


Figure 2 – Main topics of the VIF D-A-CH tender, Call 2020 Automation

The answering of at least parts of the respective research questions, which is now possible after the end of the project, creates an overall picture of how simulation (SYMUL8), digitization of the data (DIGEST) and digitization of the regulations (Lex2Vehicle) help shaping the safe and traffic-efficient introduction of connected automated vehicles by infrastructure operators.

Based on the current Austrian and international trends, **cultural specifics, inclusion, scarcity of resources, aspects of the circular economy and sustainability** are almost **mandatory to be considered** in a discussion



on the topic "CCAM Decision Support Platform". In addition, the topic must be integrated into the **strategy preparations for digital infrastructure and accompanying measures** in the context of automated mobility.

**Ongoing monitoring activities:** In the dynamic environment, **developments** among other road operators and in the ecosystem of digital transport infrastructures **will be continuously observed** and international assessments **evaluated** for the consequences for the D-A-CH level. This is particularly true with regard to **alternative harmonization and standardization efforts** by different actors. Furthermore, it should be explicitly proactively monitored how barriers to **cross-company cooperation** in the context of a CCAM Decision Support Platform are dealt with (e.g. What barriers arise when monitoring and sharing information quality and, in particular, information from third parties?)

Essential questions are focusing on a dynamic readjustment of the potential feasibility and consequences of a CCAM Decision Support Platform for a national road operator. Furthermore, the following will have to be taken into account:

- Which data and data sources should be made available as a matter of priority given the dynamic spread of various CCAM applications, and in what quality?
- What information is crucial for the desired services and what data sources/properties do you need?
- To what extent can a more controllable maintenance use case be integrated as a first application?
- To what extent would more efficient and effective multimodal cooperation including traffic management be a priority application?
- How can future automated vehicle services be effectively supported?
- Especially when third-party providers are considered in a collaborative relationship, does this require far-reaching changes in processes and agreements?
- How robust is the business ecosystem and how can risks be taken into account that a sustainable ecosystem will develop or can develop (e.g. data offerings will disappear or the cost/price ratio will change significantly)?
- How can the right or advantageous point in time for certain cooperation decisions or for certain switching decisions be communicated to broader stakeholder communities in a comprehensible manner?

## Next Steps

The aim is to **further develop the findings from the three projects and to bring them together at the interfaces**. There are common and specific things both in relation to the projects and in relation to the three countries. This needs to be worked out and deepened both horizontally and vertically.

The **role of the road operators** in the design of the content of the call for tenders and in the consistent and continuous support of the project consortia (providing information, coordinating the implementation of the

R&D projects over the entire term) should be presented as a successful processing model and proposed as a future-oriented form of mission-oriented research.

A further development of the project results could take place in **three steps/phases**:

- (1) **operational short-term continuation** of the cooperation between DIGEST project partners and the ESRIUM project partner ASFINAG. Thus, the already started cooperation could be used to integrate the ESRIUM project results in the area of asset management into the demonstrator of the CCAM Decision Support Platform with real data.
- (2) **Continuation** of the project results at the **national or D-A-CH level** by further developing the information models for use cases in the field of traffic management and networked and automated driving (e.g. ISA) in close cooperation with selected OEMs.
- (3) **Continuation** of the project results in a **European context (EU project)** as a basis for a European standardization of the results (e.g. north-south corridor through Europe, where ISA is implemented) in close cooperation with OEMs. In this European context, the basis for a European harmonized digital publication of road traffic regulations should also be created. Infrastructure operators at all levels (federal/state/municipal) as well as transport authorities must be integrated into the entire process, as they play a key role in implementation. In this respect, they should be given a project-related role in order to ensure that the R&D results can be implemented in practice.