Bernard Technologies GmbH

GAIA-X *4* Advanced Mobility Services

Partnerspezifischer Abschlussbericht GAIA-X 4 AMS
Bernard Technologies GmbH
19S21004E

November 2025

Finanziert von der Europäischen Union
NextGenerationEU

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung ... 3
1.1 Hintergrund des Gesamtprojekts ... 3
1.2 Rolle der Bernard Technologies im Konsortium ... 4
1.3 Überblick über unsere Arbeitspakete und Verantwortlichkeiten ... 5
2. Technische Umsetzung und Vorgehensweise ... 8
2.1 Methodischer Ansatz ... 8
2.2 Eingesetzte Technologien und Werkzeuge ... 10
2.3 Datenmodelle, Schnittstellen und Protokolle ... 11
3. Technische Ergebnisse ... 12
3.1 KI-basierte Detektion von Verkehrsteilnehmern und Ereignissen ... 12
3.2 Infrastruktur- und Schnittstellenentwicklung ... 16
3.3 Aufbau eines digitalisierten Routing- und Simulationsframeworks ... 17
3.4 Leitstellentaugliche Integrationen ... 21
3.5 Demonstratoren & Projekterprobung ... 21
3.6 Einbindung von Gaia-X über Atlas-X ... 23
3.7 Beiträge zur technischen Dokumentation und Evaluation ... 25
3.8 Übergreifende technische Bewertung ... 26
4. Bewertung und Zielerreichung ... 28
4.1 Erreichte Ziele vs. geplante Ziele ... 28
4.2 Technologiereifegrad (TRL) vor und nach dem Projekt ... 29
4.3 Wissenschaftlich-technische Erkenntnisse ... 30
4.4 Beitrag zum Gaia-X-Ökosystem und zu Mobilitätsdatenräumen ... 32
4.5 Herausforderungen und Lessons Learned ... 33
5. Verwertung und Ausblick – Einleitung ... 35
5.1 Interne Nutzung und Verwertung bei Bernard ... 35
5.2 Wirtschaftliche Verwertungspotenziale ... 36
5.3 Weiterführende Forschungs- und Entwicklungsansätze ... 37
6. Zusammenfassung und Schluss ... 38
Anhang A: Meetings, Konferenzen etc: ... 39
Anhang B: OpenLABEL JSON für Hindernisse ... 42

1. Einleitung

1.1 Hintergrund des Gesamtprojekts

Das Forschungsprojekt Gaia-X 4 Advanced Mobility Services (Gaia-X 4 AMS) ist Teil der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten Projektfamilie „Gaia-X 4 Future Mobility“. Ziel dieser Initiative ist der Aufbau eines europäischen, vertrauenswürdigen und interoperablen Daten- und Dienstökosystems, das Mobilitätsanwendungen der nächsten Generation unterstützt. Gaia-X stellt dabei das regelbasierte Fundament für Datenräume bereit, in denen Daten souverän, sicher und nachvollziehbar zwischen verschiedenen Akteuren ausgetauscht und genutzt werden können.

Automatisiertes und vernetztes Fahren erfordert zuverlässige, qualitativ hochwertige und in Echtzeit verfügbare Daten aus Fahrzeugen, Infrastruktur und weiteren externen Quellen. Zum Projektbeginn im Jahr 2021 befanden sich zentrale Mechanismen von Gaia-X, wie Policy Rules, Trust Framework und Federation Services, noch in der Aufbau- und Spezifikationsphase. Gleichzeitig fehlten praktische Erfahrungen zur Anwendung dieser Konzepte im Mobilitätskontext sowie erprobte technische Lösungen zur Einbindung von automatisierten Fahrzeugen in föderierte Datenräume.

Vor diesem Hintergrund verfolgt Gaia-X 4 AMS das Ziel, konkrete und praxistaugliche Lösungen für ein dezentrales Mobilitätsdaten-Ökosystem zu entwickeln. Dazu gehören sowohl Architekturkonzepte als auch Dienste, Sensorik, Datenservices und Demonstratoren, die in realen Testumgebungen validiert werden. Das Projekt bildet damit eine Brücke zwischen der Gaia-X-Vision und konkreten Mobilitätsanwendungen, insbesondere im Bereich des automatisierten Fahrens und der Rettungsmobilität.

Zwei zentrale Use Cases dienten als konkrete Referenzszenarien:

1. **ODD-gestütztes Routing für automatisierte Fahrzeuge**
    - Nutzung von Infrastruktur- und Fahrzeugsensordaten
    - Kontinuierliche Bewertung von ODD-Bedingungen
    - Bereitstellung sicherer, ODD-konformer Routen in Echtzeit
2. **Vernetzter und sicherer Rettungskorridor**
    - Priorisierung von Einsatzfahrzeugen
    - Nutzung von Infrastruktur- und Verkehrsdaten zur Routenoptimierung
    - Koordinierte Reaktionen automatisierter und vernetzter Fahrzeuge

Beide Use Cases demonstrieren, wie Gaia-X-konforme Datenräume genutzt werden können, um komplexe Mobilitätssituationen sicher und effizient zu bewältigen.

Gaia-X 4 AMS trägt damit wesentlich zum Kompetenzaufbau für dezentrale Datenräume im Mobilitätssektor bei. Es zeigt auf, wie Daten aus Fahrzeugen, Infrastruktur und externen Diensten souverän, interoperabel und vertrauenswürdig genutzt werden können, um neue Mobilitätsservices und Geschäftsmodelle zu ermöglichen – insbesondere dort, wo bisher keine standardisierten oder erprobten Lösungen existierten.

1.2 Rolle der Bernard Technologies im Konsortium

Die Bernard Technologies GmbH übernahm im Projekt *Gaia-X 4 AMS* eine zentrale Rolle bei der Entwicklung und Erprobung infrastrukturbasierter Sensorik, datengetriebener Verkehrsmodelle sowie ODD-konformer Dienste zur Unterstützung des automatisierten Fahrens. Als technologieorientierter Partner mit Schwerpunkt auf Verkehrsingenieurwesen, Sensorikentwicklung und simulationsgestützten Mobilitätsanwendungen leistete Bernard wesentliche Beiträge in mehreren Teilprojekten, insbesondere in TP2, TP4 und TP5.

Im **Teilprojekt 2 – Infrastruktur-Ökosystem** verantwortete Bernard die Entwicklung grundlegender Konzepte für den straßenseitigen Betrieb von Gaia-X-fähigen Infrastrukturdiensten. Dazu gehörten die Erstellung eines detaillierten Anforderungsprofils für Datenqualität, -verfügbarkeit und -zuverlässigkeit sowie die Ausarbeitung eines Betriebskonzepts für die Einbindung von Infrastrukturdaten in Verkehrsleitzentralen. Weiterhin definierte Bernard die technischen und rechtlichen Anforderungen für die Integration von Infrastrukturkomponenten, Sensorik und Gaia-X-Diensten. Ein besonderer Fokus lag dabei auf Schnittstellen zwischen Sensoren, Datenräumen und Leitstellen.

Im **Teilprojekt 4 – Sichere Koordination von autonomen Fahrzeugen** übernahm Bernard eine führende Rolle bei der Spezifikation, Modellierung und Implementierung der ODD-getriebenen dynamischen Routenplanung. Dies umfasste die Erarbeitung zentraler Anwendungsfälle, die Definition datengetriebener Verkehrsmodelle und die Ableitung der Schnittstellen für ein iteratives Routing unter Berücksichtigung von ODD-Parametern. Zudem lieferte Bernard wesentliche Beiträge zur infrastrukturseitigen Datenerfassung, insbesondere durch die Entwicklung eines optischen Sensorsystems zur Erkennung von Verkehrsfluss, Hindernissen und relevanten Verkehrssituationen.

Im **Teilprojekt 5 – Vernetzter und sicherer Rettungskorridor** war Bernard federführend an der Definition und Umsetzung mehrerer Anwendungsfälle beteiligt, darunter die Verkehrsflussanalyse, die Erkennung von Einsatzfahrzeugen sowie die drohnenbasierte Erfassung des Verkehrsaufkommens. Mit dem „Bernard Mobility Analyser“ und weiteren Sensorikprototypen stellte Bernard sowohl innovative Hardware als auch Software zur Verfügung, die in die Demonstratoren integriert wurden. Darüber hinaus unterstützte Bernard die Konzeption einer priorisierten Steuerung von Lichtsignalanlagen und die Weiterleitung von Detektionsereignissen an Gaia-X-Dienste und Verkehrssimulationen.

Im **Teilprojekt 6 – Projektmanagement und Zusammenarbeit in der Projektfamilie** übernahm Bernard zusätzliche Leitungsaufgaben. Das Unternehmen führte zwei Arbeitspakete (AP 4.2 und AP 5.2) und koordinierte die straßenseitige Umsetzung der Demonstratoren. Darüber hinaus trug Bernard zur Dissemination der Projektergebnisse bei, unter anderem durch Vorträge, Messeauftritte, Workshops und die Präsentation eines interaktiven Demonstrators im Rahmen der Projektfamilientreffen.

Durch diese vielfältigen Beiträge nahm die Bernard Technologies GmbH im Projekt eine Schlüsselposition sowohl in der technischen Entwicklung und Validierung von Sensorik und Verkehrsmodellen als auch in der Ausgestaltung von Gaia-X-fähigen Mobilitätsdiensten und deren praxisnaher Demonstration ein. Bernard lieferte damit einen wesentlichen Baustein für die Realisierung eines souveränen, interoperablen und skalierbaren Mobilitätsdatenraums.

1.3 Überblick über unsere Arbeitspakete und Verantwortlichkeiten

Die Bernard Technologies GmbH war im Projekt *Gaia-X 4 AMS* in mehreren zentralen Teilprojekten und Arbeitspaketen tätig. Die Verantwortlichkeiten umfassten konzeptionelle, technische und operative Aufgaben entlang des gesamten Entwicklungsprozesses – von der Anforderungsanalyse über die Implementierung bis zur Demonstration. Die folgenden Abschnitte geben einen strukturierten Überblick über die eigenen Arbeitspakete und Aufgaben.

Teilprojekt 2 – Infrastruktur-Ökosystem

Bernard übernahm innerhalb von TP2 grundlegende Arbeiten zur straßenseitigen Integration von Gaia-X-Diensten und Infrastruktursensorik. Dazu gehörten:

AP 2.1: Betriebskonzept

- Erstellung eines Anforderungsprofils an die Datenqualität, -verfügbarkeit und -zuverlässigkeit zur straßenseitigen Implementierung
- Betriebskonzept zur Anbindung von Infrastrukturdaten in Abstimmung mit Verkehrsleitzentralen

AP 2.2: Datenleitzentrale

- Identifikation der verkehrsrechtlichen Rahmenbedingungen und Anforderungen, um eine straßenseitige Implementierung zu ermöglichen
- Schnittstelle zwischen Infrastruktursensoren und Gaia-X
- Schnittstelle zwischen Gaia-X und straßenseitige Leitzentralen / Steuermodule
- Analyse des Mobilitätsverhaltens durch Auswertung der erfassten der Trajektorien
- Identifikation von „beinahe-Unfälle“, Anomalien und andere Gefahrensituationen im Straßenverkehr

Diese Arbeiten bilden die technische Grundlage für eine sichere und skalierbare Integration von realen Infrastrukturdaten in Gaia-X-Datenräume.

Teilprojekt 4 – Sichere Koordination von autonomen Fahrzeugen

In TP4 übernahm Bernard sowohl leitende als auch unterstützende Aufgaben für die ODD-getriebene Routenplanung und die infrastrukturbasierte Sensordatenerfassung.

AP 4.1 – Anforderungsmanagement, Spezifikation und rechtliche Implikationen

- Anforderungen an die Schnittstellen zwischen infrastrukturbasierter Sensorik und Fahrzeug
- Erstellung eines Anforderungskatalogs der Infrastruktur zum sicheren Betrieb automatisierter Fahrzeuge
- Analyse der Anforderungen an die Sensorik zur Einbindung von infrastrukturbasierten Daten

AP 4.2 – ODD-getriebene Routenplanung für automatisierte Fahrzeuge *(AP-Leitung durch Bernard)*

- Aufbau der Schnittstelle zur Verkehrsleitzentrale
- Erstellung eines Verkehrsmodells am Demonstrationsstandort
- Ausbau des Verkehrsmodells als Vorbereitung zur Echtzeitfähigkeit
- Aufbereitung von infrastrukturbasierten Daten (z.B. Echtzeit-Verkehrsdaten in Verkehrsrechner)
- Planung der Einbindung von Infrastrukturdaten zur dynamischen Routenberechnung
- Umsetzung Schnittstelle zwischen Echtzeitdaten und Verkehrsmodell
- Umsetzung Schnittstelle zwischen Verkehrsmodell und Routenplanung

- Planung von straßenseitigen Maßnahmen zur sicheren Implementierung von autonomem Fahren

AP 4.4 – Demonstration und Validierung

- Straßenseitige Implementierung unter Einhaltung der rechtlichen Anforderungen
- Anbindung von infrastrukturbasierten Daten im Demonstrationsgebiet
- Umsetzung der straßenseitigen Maßnahmen zum sicheren Betrieb des Demonstrators

Teilprojekt 5 – Vernetzter und sicherer Rettungskorridor

Bernard war in TP5 umfassend in die technische Umsetzung, Datengenerierung und Sensorkonzeption eingebunden.

AP 5.1 – Anforderungsmanagement und Architekturentwicklung

- Mitwirkung beim Anforderungsmanagement mit Fokus auf Sensorik

AP 5.2 – Datengenerierung und Algorithmen zur Situationserfassung *(AP-Leitung durch Bernard)*

- Erhebung des Verkehrsaufkommens
- Erweiterung des BERNARD Mobility Analyser zur automatischen Erkennung von Einsatzfahrzeugen
- Planung von verkehrsplanerischen und verkehrstechnischen Maßnahmen zur Priorisierung der Einsatzfahrzeuge (z.B. Adaptive Steuerung der Lichtsignalanlagen)
- Definition der Schnittstelle in das Steuergerät der Lichtsignalanlagen
- Einsatz von Algorithmen zur Erfassung des Verkehrsaufkommens aus drohnenbasierter Sensorik
- Umsetzung der Schnittstelle von Echtzeit-Verkehrsdaten aus infrastrukturbasierter Sensorik, insbesondere
- aus drohnenbasierter Erhebung
- Systemdesign für automatisierte Datenauswertung in drohnenbasierter Sensorik zur echtzeitfähigen Erfassung des Verkehrsaufkommens

AP 5.4 – Simulation und simulative Validierung

- Beteiligung an makroskopischer Verkehrssimulation anhand von Echtzeitverkehrsdaten

AP 5.5 – Demonstration und Validierung

- Anpassung des Verkehrsmodells im Demonstrationsbereich
- Einbindung von Echtzeitdaten in das Verkehrsmodell
- Makroskopische Verkehrssimulation anhand von Echtzeitdaten zur Berechnung der optimalen Route mittels Verkehrsdaten
- Umsetzung der Schnittstelle zur lokalen Verkehrsleitzentrale

AP 5.6 – Schnittstellen zu den Gaia-X Services

- Abstimmung der Schnittstellen zur Einbindung der Sensorik in Gaia-X

Teilprojekt 6 – Projektmanagement, Zusammenarbeit in der Projektfamilie und Dissemination

Bernard übernahm im TP6 zusätzliche organisatorische und koordinative Aufgaben:

AP 6.1 – Wissenschaftliche Leitung und Projektmanagement

- Leitung des Arbeitspaktes AP 4.2 in TP4 und Unterstützung bei der Projektkoordination zur Durchführung der Demonstratoren
- Leitung des Arbeitspaktes AP 5.2 in TP5 und Unterstützung bei der Projektkoordination zur Durchführung der Demonstratoren
- Ergebnisverbreitung bzgl. der straßenseitigen Umsetzung der Use Cases

AP 6.2 – Vernetzung innerhalb der Projektfamilie

- Einbindung von Daten bestehender Infrastruktur Sensorik

AP 6.3 – Dokumentation und Ergebnisverbreitung

- Werbekampagne im öffentlichen Sektor mit Fokus auf den erzielten Mehrwert der umgesetzten Use Cases

2. Technische Umsetzung und Vorgehensweise

Die technische Umsetzung der im Projekt *Gaia-X 4 AMS* zugewiesenen Aufgaben erfolgte durch die Bernard Technologies GmbH in mehreren aufeinander aufbauenden Schritten, die konzeptionelle Vorarbeiten, algorithmische Entwicklungen, Sensorikprototyping sowie die Integration in reale und simulierte Demonstrationsumgebungen umfassten. Aufbauend auf den in Kapitel 1.3 beschriebenen Arbeitspaketen wurden zunächst Anforderungen, Schnittstellen und Architekturkomponenten spezifiziert, bevor diese in konkrete technische Implementierungen überführt wurden.

Bernard verfolgte dabei einen methodischen Ansatz, der die Kombination aus ingenieurtechnischen Verfahren, KI-basierter Datenverarbeitung, verkehrsplanerischen Modellen und Gaia-X-konformen Datenarchitekturen miteinander verbindet. Eine zentrale Rolle spielte die enge Verzahnung zwischen Infrastruktur- und Simulationsdaten, da diese sowohl für die dynamische Routenplanung automatisierter Fahrzeuge als auch für die Gestaltung eines sicheren Rettungskorridors essenziell sind.

Die technische Umsetzung erfolgte iterativ:

1. **Konzeptionelle Phase:** Definition der Use Cases, Ableitung funktionaler Anforderungen, Identifikation relevanter Datenquellen sowie Ausarbeitung von Schnittstellen und Datenformaten.
2. **Entwicklungsphase:** Implementierung der Sensorsoftware, Entwicklung KI-basierter Erkennungsverfahren, Aufbau der Hardwareprototypen, Modellierung von Verkehrs- und Routingalgorithmen.
3. **Integrationsphase:** Einbindung der entwickelten Komponenten in Verkehrsmodelle, Leitstellenanwendungen und Gaia-X-Dienste; Austausch mit Konsortialpartnern zur Harmonisierung der Schnittstellen.
4. **Validierungs- und Demonstrationsphase:** Durchführung von Simulationen, Systemtests und realitätsnahen Demonstrationen zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit im Zusammenspiel aller Dienste.

Dieser systematische Ansatz gewährleistete, dass die entwickelten Lösungen nicht nur funktional und technisch valide sind, sondern auch den Anforderungen eines föderierten, interoperablen Datenraums entsprechen. Die folgenden Unterkapitel beschreiben die angewandten Methoden, eingesetzten Technologien und umgesetzten technischen Komponenten im Detail. Die konkreten Ergebnisse der beschriebenen Arbeiten werden in Kapitel 4 detailliert dargestellt.

2.1 Methodischer Ansatz

Die technische Bearbeitung der Arbeitspakete durch die Bernard Technologies GmbH folgte einem klar strukturierten, ingenieurwissenschaftlich fundierten und iterativen Vorgehensmodell. Dieses Vorgehen kombiniert systematische Anforderungsanalyse, modellgestützte Entwicklung, KI-basierte Verfahren der Verkehrsdatenverarbeitung sowie praxisnahe Erprobung im Demonstrationsumfeld. Ziel war es, Technologien zu entwickeln, die sowohl die Anforderungen von Gaia-X erfüllen als auch in realen Mobilitätsanwendungen zuverlässig funktionieren.

Der methodische Ansatz stützt sich auf vier Kernprinzipien:

Systematische Anforderungs- und Use-Case-Analyse

Zu Beginn wurden die fachlichen, rechtlichen und technischen Anforderungen in enger Abstimmung mit dem Konsortium erhoben. Dazu gehörten:

- Analyse verkehrsrechtlicher Vorgaben für Infrastruktur- und Rettungsszenarien
- Identifikation aller relevanten Datenquellen (Sensorik, Verkehrszentralen, Drohnen, Simulationen)
- Definition der Use Cases „A Priori“ und „En Route“ im Kontext des ODD-Routings
- Ableitung der funktionalen Anforderungen für Routing, Sensorik, Datenqualität und Simulationen
- Erstellung strukturierter Ablauf- und Swimlane-Modelle zur Klärung aller Dienste und Datenflüsse

Diese Vorgehensweise bildete eine stabile Grundlage für die nachfolgende Architektur- und Implementierungsphase.

Iterative Architektur- und Schnittstellenspezifikation

Ein wesentlicher Bestandteil der Arbeit war die Entwicklung modularer und interoperabler Architekturen, die sowohl mit Gaia-X-Prinzipien als auch mit realer Infrastruktur kompatibel sind. Dazu wurde folgendes methodisch umgesetzt:

- Definition von Schnittstellen zwischen Sensorik, Verkehrsmodellen, Routingdiensten und ODD-Matching
- Verwendung standardisierter Datenformate (JSON, OpenLABEL) und interoperabler Datenmodelle
- Entwurf klarer Kommunikations- und Datenverarbeitungspipelines
- Kontinuierliche Abstimmung mit Partnern, um Heterogenität zwischen bestehenden und neuen Diensten zu harmonisieren
- Test der Schnittstellen mittels Prototypen (z. B. MQTT-Events für Hinderniserkennung)

Durch diese methodische Modularisierung wurde sichergestellt, dass die entwickelten Komponenten flexibel anwendbar und leicht integrierbar sind.

Modell- und KI-gestützte Entwicklung

Zur Umsetzung der technischen Anforderungen wurden verschiedene modell- und datenbasierte Entwicklungsansätze eingesetzt:

Verkehrsmodellierung (mikro- und makroskopisch)

- Aufbau eines detaillierten mikroskopischen Verkehrsmodells für Braunschweig
- Integration von Echtzeitdaten zur dynamischen Anpassung der Simulation
- Nutzung der Simulation als Grundlage für ODD-konforme Routingentscheidungen

KI-basierte Sensorikentwicklung

- Training neuronaler Netze zur Objekterkennung, Klassifikation und Tracking
- Entwicklung von Algorithmen zur Ereignisgenerierung (z. B. Hindernisse, Verkehrsfluss, Einsatzfahrzeuge)
- Einsatz eines strukturieren Labeling-Prozesses für Trainingsdaten
- Validierung der Algorithmen mittels strukturierter Testszenarien

Diese modellgestützte Vorgehensweise ermöglichte eine präzise technische Umsetzung, selbst in dynamischen und komplexen Verkehrssituationen.

Integrations-, Validierungs- und Demonstrationsorientiertes Arbeiten

Die entwickelten Komponenten wurden iterativ in reale und simulative Umgebungen integriert:

- Schrittweise Einbindung der Sensorik in Verkehrsmodelle
- Echtzeitübertragung der Sensordaten an ODD-Matching- und Routingdienste
- Validierung der Routingalgorithmen anhand realer und simulierter Verkehrssituationen
- Aufbau eines Demonstrationsmodells für die Hinderniserkennung
- Test der Datenschnittstellen im Konsortium sowie im Testfeld

Diese praxisorientierte Methodik stellte sicher, dass entwickelte Funktionen unter realen Bedingungen robust und zuverlässig arbeiten.

2.2 Eingesetzte Technologien und Werkzeuge

Die technische Umsetzung der Arbeitspakete erforderte den gezielten Einsatz moderner Software-, Hardware- und KI-Technologien, die den methodischen Rahmen für die Entwicklung der Sensorik-, Simulations- und Routingkomponenten bildeten. Der Einsatz dieser Technologien diente nicht der Darstellung einzelner Ergebnisse, sondern unterstützte das iterative Vorgehen aus Modellierung, Prototyping, Schnittstellenentwicklung und Validierung.

Für die KI-gestützte Verarbeitung der Infrastrukturdaten kamen etablierte Deep-Learning-Frameworks zum Einsatz, die sich für ressourcenbeschränkte Edge-Plattformen eignen und eine effiziente Erkennung und Vorverarbeitung von Verkehrsszenen ermöglichen. Ergänzend wurde auf eine robuste Edge-Hardwareumgebung gesetzt, welche die lokale Inferenz, Datenvorverarbeitung und ereignisbasierte Weiterleitung zuverlässig unterstützt. Diese Kombination erlaubte eine agile Entwicklung und schnelle Testzyklen in realen wie simulativen Umgebungen.

Die Kommunikation zwischen Sensorik, Backend, Verkehrsmodellen und Routingdiensten basierte auf leichtgewichtigen und interoperablen Technologien, die speziell für verteilte Mobilitätssysteme geeignet sind. Hierzu zählten ereignisorientierte Übertragungsprotokolle sowie REST-ähnliche Schnittstellen für den Austausch von Routendaten und Modelldiensten. Diese Werkzeuge bildeten die Grundlage für eine flexible Entkopplung der Dienste und eine effiziente Integration mit Systemen der Projektpartner.

Zur Entwicklung und Validierung der modellgestützten Dienste wurden sowohl mikroskopische als auch makroskopische Verkehrsmodelle genutzt. Diese dienten der Simulation unterschiedlicher Verkehrslagen und Szenarien, der Einbindung von Sensordaten sowie der Bewertung von ODD-Konformität entlang von Routen. Ergänzende Backend- und Datenbanktechnologien ermöglichten eine strukturierte Speicherung, Verarbeitung und Analyse der erzeugten Datenströme sowie ein effizientes Monitoring der eingesetzten Sensorknoten.

Durch den kombinierten Einsatz dieser Technologien konnte ein durchgängiger Entwicklungs-, Test- und Integrationsprozess etabliert werden, der die methodische Grundlage für die in Kapitel 4 beschriebenen technischen Ergebnisse bildete.

2.3 Datenmodelle, Schnittstellen und Protokolle

Für die Integration der von Bernard Technologies entwickelten Sensorik-, Simulations- und Routingkomponenten war eine frühzeitige methodische Harmonisierung der Datenmodelle und Schnittstellen von zentraler Bedeutung. Da das Projekt im Kontext eines föderierten Gaia-X-Datenraums verankert ist, wurde bei allen technischen Entscheidungen auf Interoperabilität, Offenheit und Konsistenz der Datenstrukturen geachtet. Die Ausgestaltung der Datenmodelle und Kommunikationsmechanismen folgte dabei einem klaren methodischen Ansatz, der im Folgenden zusammengefasst wird.

Zu Beginn wurden die funktionalen Anforderungen an die auszutauschenden Daten – etwa Ereignisse aus der Sensorik, Verkehrsflussinformationen, Routenbeschreibungen und Metadaten – analysiert und in abstrahierter Form modelliert. Auf dieser Grundlage erfolgte die Auswahl offener, standardisierter Formate wie JSON und OpenLABEL, da diese eine hohe Lesbarkeit, Maschinenverarbeitbarkeit und Erweiterbarkeit gewährleisten. Die Entscheidung für diese Standards bildete die methodische Grundlage für die spätere Implementierung interoperabler Datenmodelle, die zwischen Sensorik, Simulation, ODD-Matching und Routingdiensten konsistent genutzt werden können.

Parallel dazu wurde ein generisches Schnittstellenkonzept entwickelt, das den Austausch von Sensordaten, Verkehrsmodellergebnissen und Dienstaufrufen klar strukturiert. Dabei lag der Fokus auf einer modularen Entkopplung der Systeme, sodass einzelne Komponenten unabhängig voneinander entwickelt, getestet und integriert werden konnten. In diesem Rahmen wurden Kommunikationsmuster definiert, die sowohl ereignisbasierte Übertragungen als auch dienstorientierte Abfragen unterstützen. Als methodische Grundlage wurden dabei leichtgewichtige und etablierte Protokolle wie MQTT und REST-ähnliche HTTP-Schnittstellen vorgesehen, da diese insbesondere für verteilte Mobilitätssysteme eine robuste und flexible Kommunikation ermöglichen.

Ein weiterer methodischer Schwerpunkt lag auf der Spezifikation klarer Metadaten- und Identitätsstrukturen, um spätere Anforderungen an Datenhoheit, Transparenz und Nachvollziehbarkeit zu erfüllen – zentrale Prinzipien im Gaia-X-Kontext. Bereits in der Modellierungsphase wurde deshalb definiert, welche Metadaten für Sensordaten, Ereignisse oder Modelloutputs erforderlich sind, damit diese eindeutig zuordenbar, semantisch verständlich und später für föderierte Nutzungskontrolle geeignet sind.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass diese Arbeiten den methodischen Rahmen für die spätere Implementierung der Datenmodelle, Schnittstellen und Kommunikationsmechanismen bilden. Die konkreten Ausprägungen, technischen Strukturen und umgesetzten Formate sind im Ergebniskapitel 4 ausführlich beschrieben.

3. Technische Ergebnisse

Die Bernard Technologies GmbH erzielte im Projekt Gaia-X 4 AMS eine Vielzahl von technischen, methodischen und konzeptionellen Ergebnissen, die wesentlich zum Erfolg der Use Cases „Sichere Koordination von autonomen Fahrzeugen“ und „Vernetzter und sicherer Rettungskorridor“ beitrugen. Aufbauend auf den in Kapitel 3 beschriebenen technischen Vorgehensweisen wurden im Verlauf des Projekts sowohl Software- und Hardwareprototypen als auch Datenmodelle, Simulationskomponenten, Schnittstellen und Demonstratoren entwickelt, implementiert und validiert.

Durch die enge Verzahnung von Sensorik, Verkehrsmodellierung, ODD-getriebener Routenplanung und Gaia-X-konformer Datenarchitektur entstanden Lösungen, die sowohl funktional praxistauglich als auch auf eine künftige Integration in föderierte Datenräume ausgelegt sind. Besonderen Mehrwert generierten dabei die KI-basierten Modelle, die prozessualen und algorithmischen Module für dynamische Routenentscheidungen sowie die im Projekt entwickelten Methoden zur Analyse komplexer Verkehrssituationen.

Die folgenden Unterkapitel beschreiben die erzielten Ergebnisse strukturiert entlang ihrer technischen Domänen. Dazu gehören unter anderem die optische Infrastruktur-Sensorik, die Algorithmen zur Verkehrsfluss- und Hinderniserkennung, die ODD-getriebene Routenplanung, die Verkehrsmodelle für die Demonstrationsstandorte sowie die prototypische Integration in Leitstellen und Gaia-X-Dienste. Ergänzend werden die Beiträge zur Demonstration, Validierung und Ergebnisverbreitung dokumentiert.

3.1 KI-basierte Detektion von Verkehrsteilnehmern und Ereignissen

Im Rahmen des Projekts Gaia-X 4 AMS wurde ein infrastrukturseitiger optischer Sensor gezielt weiterentwickelt, um eine zuverlässige, KI-basierte Erfassung und Interpretation von Verkehrssituationen zu ermöglichen. Die Grundstruktur des Sensors existierte bereits vor Projektbeginn, war jedoch noch nicht auf die im Projekt definierten Use Cases – insbesondere Routing, ODD-Matching und Rettungskorridor – spezialisiert. Im Projektverlauf wurde die Sensorik sowohl funktional als auch hardwareseitig erweitert, sodass sie nun als wesentliche Datenquelle für vernetzte Mobilitätsdienste im Gaia-X-Kontext genutzt werden kann.

Der Sensor bildet die technische Schnittstelle zwischen physischer Verkehrsinfrastruktur und digitalen Diensten innerhalb eines föderierten Datenraums. Neben der reinen Videoerfassung analysiert das System Verkehrsszenen lokal am Gerät mithilfe eingebetteter neuronaler Netze und generiert daraus strukturierte, maschinenlesbare Ereignisse. Diese Echtzeitverarbeitung sowie die ausschließliche lokale Analyse der Bilddaten ermöglichen einen datenschutzkonformen Betrieb ohne Übermittlung von Rohvideodaten.

Optische KI-basierte Verkehrserkennung

Zentrales Element des Systems ist ein lokal ausgeführtes Deep-Learning-Modell, das auf einer NVIDIA-Jetson-Recheneinheit implementiert wurde. Das Modell wurde im Projekt so weiterentwickelt, dass es Verkehrsteilnehmer zuverlässig erkennen, klassifizieren und über ihre Trajektorien hinweg verfolgen kann. Neben der ursprünglichen Klassifikationslogik wurden sämtliche TLS-8+1-Klassen sowie zusätzliche Kategorien wie Fahrräder, Fußgänger, Scooter-Fahrende und Straßenbahnen integriert. Dadurch kann der Sensor komplexe Verkehrsszenen differenziert abbilden und für nachgelagerte Dienste verwertbare Daten bereitstellen.

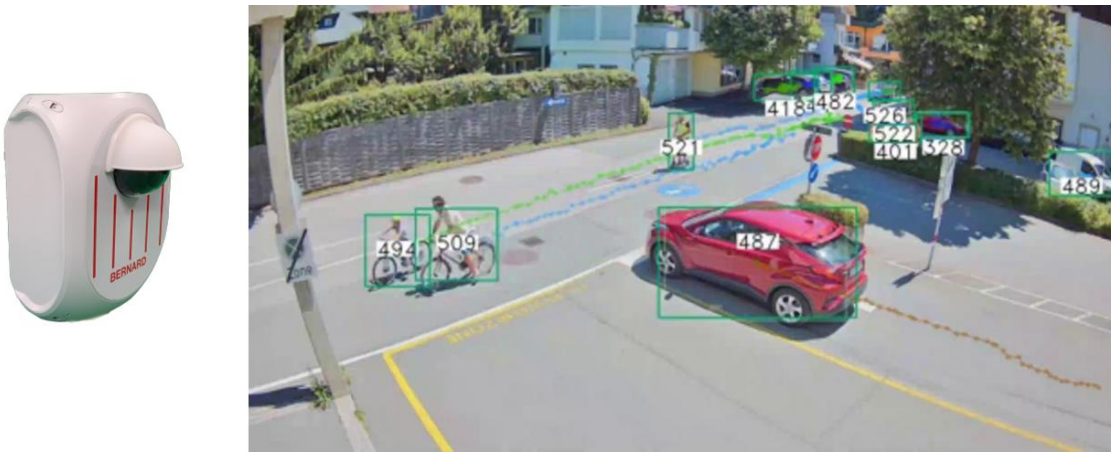

Abbildung 1: Links ist der optische Sensor für Verkehrszählungen zu sehen. Rechts wird ein beispielhafter Kreuzungsbereich gezeigt, an den die verschiedenen Verkehrsteilnehmer erkannt werden und mit einem grünen Rechteck markiert werden.

Hinderniserkennung und Ereignisgenerierung

Ergänzend zur Verkehrsteilnehmererkennung wurde ein Verfahren zur Hinderniserkennung und -klassifikation implementiert. Durch Analyse der zeitlichen Persistenz erkannter Objekte unterscheidet das System zwischen normalen Verkehrsbewegungen und ungewöhnlichen oder sicherheitsrelevanten Situationen. Erkennt die Sensorik beispielsweise ein stehendes Fahrzeug oder ein unerwartetes Hindernis, wird automatisch ein strukturiertes Ereignis im OpenLABEL-Format generiert, das unmittelbar für Anwendungen wie dynamische Routenplanung, ODD-Bewertung oder sicherheitskritische Analysen genutzt werden kann.

Einsatzfahrzeugerkennung

Zu Beginn wurde im Projekt untersucht, ob Einsatzfahrzeuge zuverlässig über das optische Erkennungssystem detektiert werden können. Obwohl das eingesetzte neuronale Netz grundsätzlich in der Lage war, entsprechende Fahrzeugtypen zu identifizieren, zeigte sich in den Tests, dass die Erkennungsrate nicht ausreichte und die Fehlklassifikationen zu hoch waren. Zudem konnte über die optische Analyse nicht zuverlässig bestimmt werden, ob ein erfasstes Fahrzeug tatsächlich im Einsatz ist. Die Auswertung der Fehlklassifikationen ergab, dass diese Anforderungen mit rein visuellen Merkmalen nur schwer oder gar nicht robust erfüllbar sind.

Aus diesem Grund wurde ein ergänzendes akustisches Verfahren zur Detektion von Einsatzfahrzeugen entwickelt, das auf der Erkennung von Folgetonhornsignalen basiert. Für die prototypische Umsetzung wurde ein bestehender akustischer Sensor aus dem Unternehmensportfolio genutzt, der ursprünglich für das Monitoring von Brücken entwickelt wurde. Dieses Gerät verfügt über eine GPU-beschleunigte Recheneinheit, auf der eine neu entwickelte KI zur Audioanalyse implementiert wurde.

Der Erkennungsalgorithmus arbeitet mit kurzen Audioausschnitten, aus denen Spektrogramme berechnet werden. Diese Spektrogramme dienen als bildbasierte Eingabe für ein Detektionsmodell, das das charakteristische Muster eines Folgetonhorns identifiziert (siehe Abbildung 2). Die Erstellung geeigneter Trainingsdaten stellte dabei einen besonderen Aufwand dar: Es mussten zahlreiche Audioaufnahmen von Folgetonhörnern gesammelt und annotiert werden, wobei die Markierung relevanter Bereiche im Spektrogramm nur mit präziser Kenntnis der akustischen Ereignisse möglich ist. Für einen späteren produktiven Einsatz wäre eine deutlich ausgeweitete und systematischere Datengenerierung notwendig. Aufgrund der im Vergleich zu optischen Verkehrsdaten deutlich

geringeren Datenmenge wurde das Modell zunächst auf in Deutschland verwendete Folgetonhörner beschränkt.

Das akustische Verfahren wurde erfolgreich implementiert und anhand realer Audioaufnahmen validiert. Dadurch können Einsatzfahrzeuge nun deutlich zuverlässiger erkannt werden als mit dem optischen System allein. Die erzeugten Ereignisse stehen nachgelagerten Diensten zur Verfügung.

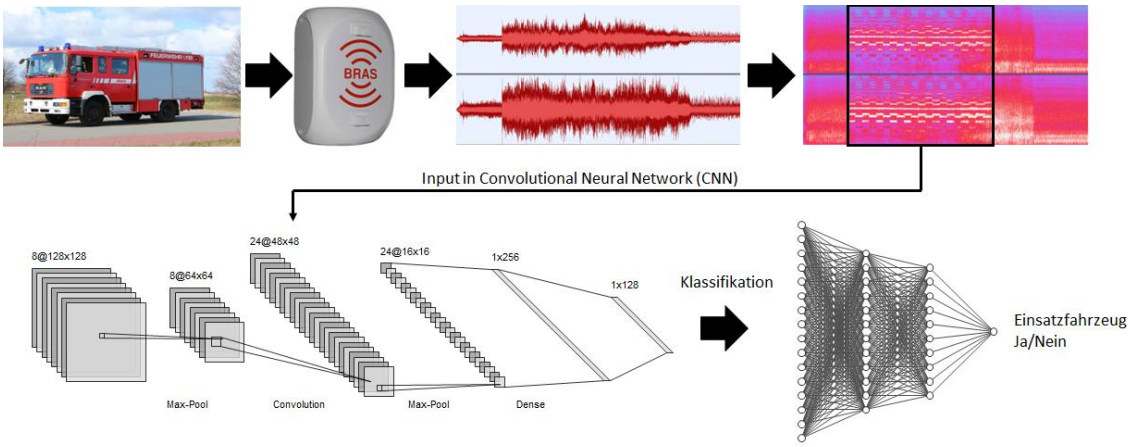

Abbildung 2: Funktionsweise der Einsatzfahrzeugerkennung mittels akustischer Sensorik.

Hardware-Weiterentwicklungen

Um die erweiterten Anforderungen hinsichtlich Rechenleistung, Energieversorgung und Outdoor-Tauglichkeit zu erfüllen, wurde die Hardwarearchitektur des Sensors ebenfalls überarbeitet. Eine optimierte passive Kühlung ermöglicht den Betrieb auch bei hoher Rechenlast, ohne die IP65-Schutzklasse zu beeinträchtigen. Dadurch bleibt das System unter wechselnden Witterungsbedingungen zuverlässig einsetzbar.

Parallel dazu wurden mehrere Varianten der Energieversorgung und Systemintegration entwickelt, um unterschiedliche Einsatzszenarien abzudecken:

- **12-V-Akkubetrieb:**
  Mit speziell entwickelter Stromversorgungsplatine und integrierter Powerline-Kommunikation zum Akku-Management-Modul. Diese Variante ist für mobile oder temporäre Installationen geeignet.
- **230-V-Netzversorgung:**
  Eine stationäre Version mit 230-V-zu-12-V-Wandlung für Dauerbetrieb und Entwicklungsumgebungen.
- **Integration an Lichtsignalanlagen (24–30 V):**
  Version mit Encoder-Anbindung und Powerline-Kommunikation zur Weitergabe von Steuerempfehlungen an LSA-Systeme. Diese Variante dient der Untersuchung von Priorisierungsmechanismen für Einsatzfahrzeuge.

Im Zuge der ersten mobilen Testreihen zeigte sich, dass der fehlende Einblick in den aktuellen Ladestand des Akkus ein zentrales Problem darstellte. Ohne verlässliche Information zum Energiezustand bestand das Risiko, Messungen mit unzureichend geladenen Akkus zu beginnen – sei es aufgrund unvollständiger Ladeprozesse oder organisatorischer Herausforderungen beim parallelen Einsatz einer größeren Anzahl mobiler Sensoreinheiten. Besonders bei längeren Messkampagnen war

zudem unklar, wann ein Akkuwechsel notwendig war, was die Einsatzplanung erschwerte und die Kontinuität der Datenerfassung beeinträchtigen konnte.

Um diese Einschränkungen zu adressieren, wurde im Projekt eine erweiterte Akkueinheit mit integrierter Ladestandmessung entwickelt. Diese erfasst kontinuierlich Parameter wie Spannungsniveau und Ladezustand und übermittelt sie über eine Powerline-Kommunikation direkt an die Sensoreinheit. Diese Information wird direkt an eine Datenbank gesendet und in einem Dashboard dargestellt (siehe Abbildung 3). Dadurch können Ladezustände in Echtzeit überwacht und rechtzeitig Maßnahmen wie ein Akkuwechsel oder ein Zwischenladen eingeleitet werden.

Abbildung 3: Übersicht auf die mitgeloggten Informationen eines Akkus.

Diese Weiterentwicklung erhöht nicht nur die Betriebssicherheit mobiler Messreihen, sondern trägt auch maßgeblich zur Datenqualität und Vertrauenswürdigkeit bei – ein entscheidendes Kriterium im Kontext von Gaia-X. Nur wenn Messsysteme zuverlässig und durchgängig funktionsfähig sind, können ihre Daten in föderierten Datenräumen als vertrauensvolle Quelle genutzt werden und den hohen Anforderungen an Transparenz, Verfügbarkeit und Integrität entsprechen.

Adaptive Steuerung von Lichtsignalanlagen

Für die bevorrechtigte Führung von Einsatzfahrzeugen an Kreuzungen wurde im Projekt eine adaptive Lichtsignalsteuerung entwickelt. In enger Abstimmung mit externen Signalbaufirmen und Konsortialpartnern entstand hierfür ein speziell entwickelter Encoder, der die vom infrastrukturseitigen Sensor erkannten Ereignisse in Schaltvorgänge potenzialfreier Kontakte übersetzt. Diese Art der Signalausgabe wird von den meisten Lichtsignalanlagen herstellerunabhängig unterstützt und ermöglicht eine einfache Integration in bestehende Steuergeräte.

Wird ein Einsatzfahrzeug vom Sensor erkannt, wird die entsprechende Information an den Encoder übertragen, der daraufhin einen zuvor definierten Ausgang schaltet. Bei vierarmigen Kreuzungen werden vier separate Ausgänge genutzt, sodass die Lichtsignalanlage eindeutig zuordnen kann, an welchem Zufahrtsarm ein Einsatzfahrzeug detektiert wurde. Auf dieser Grundlage kann die Steuerung der Anlage so angepasst werden, dass eine sichere und effiziente Bevorrechtigung ermöglicht wird.

Der Encoder wurde im Projekt vollständig neu konstruiert. Eine besondere Herausforderung stellte dabei die Integration der Powerline-Kommunikation dar, die aufgrund der begrenzten Anzahl verfügbarer Leitungen in vorhandenen Kreuzungsinfrastrukturen zwingend erforderlich war. Für die Übertragung wurde ein eigenständig entwickeltes, bitbasiertes Protokoll eingesetzt, das eine sowohl sichere als auch latenzarme Kommunikation gewährleistet.

Da dieser Use Case im finalen Demonstrationsszenario nicht umgesetzt wurde, fand der Encoder dennoch eine praktische Anwendung im Demomodell: Dort wurde er für die Hinderniserkennung eingesetzt, um an einer Demonstrationsampel die Zustände „frei“, „kurz belegt“ und „Hindernis“ anzuzeigen. Dadurch konnte die Funktionsfähigkeit des Encoders erfolgreich im Projekt demonstriert werden.

Verkehrserkennung über Drohnenbilder

Ein weiterer technischer Entwicklungsschritt bestand in der Erprobung des KI-Algorithmus auf Luftbilddaten von Drohnen. Im Projektkonzept war vorgesehen, dass eine Drohne über Gaia-X Dienste zur datenbasierten Analyse und Anreicherung ihrer eigenen Sensordaten beziehen kann. Zu diesem Zweck wurden zuvor aufgezeichnete Luftaufnahmen mit dem entwickelten Erkennungsmodell ausgewertet. Die Analyse zeigte, dass die KI auch aus der Vogelperspektive den Verkehrsfluss zuverlässig beurteilen und Verkehrsteilnehmer robust erkennen kann.

Für die Demonstration konnte dieser Ansatz jedoch nicht vollständig umgesetzt werden, da eine Live-Übertragung von Videodaten sowie ein Flug über realen Verkehr im Rahmen der Demonstration nicht möglich waren. Die Funktionsfähigkeit des Algorithmus konnte dennoch erfolgreich anhand eines im Vorfeld aufgenommenen Drohnenvideos nachgewiesen werden.

Zusammenfassend wurde der optische Sensor im Rahmen von Gaia-X 4 AMS zu einem multifunktionalen Echtzeitsensor weiterentwickelt, der durch KI-basierte Analyseverfahren, flexible Kommunikationsschnittstellen, robuste Hardware und interoperable Ereignisdaten eine zentrale Rolle für fortschrittliche Mobilitätsdienste einnimmt. Damit bildet er einen der technisch wertvollsten Beiträge von Bernard Technologies zum Projekt – sowohl für die koordinierte Rettungsmobilität als auch für die sichere Routenplanung automatisierter Fahrzeuge.

3.2 Infrastruktur- und Schnittstellenentwicklung

Parallel zur Weiterentwicklung der KI-basierten Sensorik war der Aufbau einer robusten, interoperablen und echtzeitfähigen Dateninfrastruktur ein wesentlicher technischer Beitrag der Bernard Technologies GmbH im Projekt Gaia-X 4 AMS. Ziel dieser Arbeiten war es, die am Sensorknoten erzeugten Informationen zuverlässig in Modellierungs-, Routing- und Leitstellendienste zu überführen und zugleich die Grundlage für eine spätere Einbindung in Gaia-X-Datenräume zu schaffen.

Architektonische Grundstruktur

Die größte Herausforderung bestand darin, heterogene Datenquellen – darunter optische Sensorsysteme, Drohnenaufnahmen, Verkehrsflussanalysen, Simulationsmodelle und externe Datenströme – in eine konsistente, modular erweiterbare und skalierbare Systemarchitektur zu integrieren. Zu diesem Zweck wurde eine dreistufige Infrastruktur konzipiert, bestehend aus:

1. **Sensorebene (Edge)**
   Ereignisbasierte Datenproduktion am Sensorknoten, Vorverarbeitung durch KI-Modelle und Generierung strukturierter OpenLABEL-Events.
2. **Backendschicht (Data Hub)**
   Speicherung, Validierung und zeitkritische Weiterverarbeitung der Ereignisse sowie Bereitstellung für nachgelagerte Dienste.
3. **Dienste- und Anwendungsebene**
   Nutzung der Daten in Verkehrsmodellen, Routingprozessen, Leitstellenanwendungen und perspektivisch Gaia-X-fähigen Datenräumen.

Schnittstellenentwicklung zwischen Sensorik und Backend

Ein zentrales Element dieser Infrastruktur war die Definition und Implementierung einer zuverlässigen Kommunikationsschnittstelle zwischen dem Sensorknoten und dem Backend. Hierfür wurden bewusst leichtgewichtige Protokolle eingesetzt, insbesondere **MQTT**, da dieses geringe Latenzen, niedrige Bandbreitenanforderungen und eine hohe Robustheit bietet.

Der Sensor übermittelt hierbei nicht nur Rohinformationen, sondern vollständig strukturierte Ereignisobjekte im OpenLABEL-Format, die bereits alle relevanten Metadaten enthalten. Diese standardisierten Events ermöglichen eine direkte Weiterverarbeitung in nachgelagerten Systemen (siehe Anhang B).

Backendarchitektur und Datenverarbeitung

Das Backend fungiert als zentraler Datenknotenpunkt. Hier werden alle eingehenden Sensordaten gespeichert, validiert, analysiert und für weitere Dienste verfügbar gemacht.

Bernard implementierte hierfür eine passende Server- und Datenbankarchitektur, die sowohl zeitkritische als auch historische Datenbedarfe unterstützt. Damit wurde eine stabile Grundlage für Routing- und Simulationsanwendungen geschaffen.

Anbindung an Verkehrsmodelle

Von besonderer Bedeutung war die Integration der Ereignisdaten in mikroskopische und makroskopische Verkehrsmodelle. Hierfür entwickelte Bernard flexible Schnittstellen, über die Ereignisse wie:

- Verkehrsflussindikatoren,
- Hindernisse und
- Einsatzfahrzeugerkennungen

automatisiert in die Simulation eingespeist werden können. Dadurch werden die Modelle in die Lage versetzt, situativ auf Echtzeitveränderungen zu reagieren und realitätsnahe Verkehrssituationen abzubilden. Dies bildet eine wesentliche Grundlage für dynamische Routingentscheidungen und sicherheitskritische Bewertungen.

3.3 Aufbau eines digitalisierten Routing- und Simulationsframeworks

Im Rahmen des Teilprojekts 4 leistete die Bernard Technologies GmbH wesentliche Beiträge zur Konzeption und technischen Umsetzung eines ODD-getriebenen Routingansatzes für automatisierte Fahrzeuge. Obwohl der Routingdienst im späteren Projektverlauf aufgrund einer übergeordneten Konsortialentscheidung nicht vollständig implementiert wurde, wurden im Vorfeld zentrale technische Grundlagen geschaffen, die eine tragfähige Basis für künftige Routing- und Entscheidungsdienste bilden. Diese Arbeiten verbinden Aspekte aus Verkehrsmodellierung, algorithmischer Pfadbewertung, ODD-Analyse, Datenformatdefinition sowie der Harmonisierung unterschiedlicher Routensegmentierungslogiken.

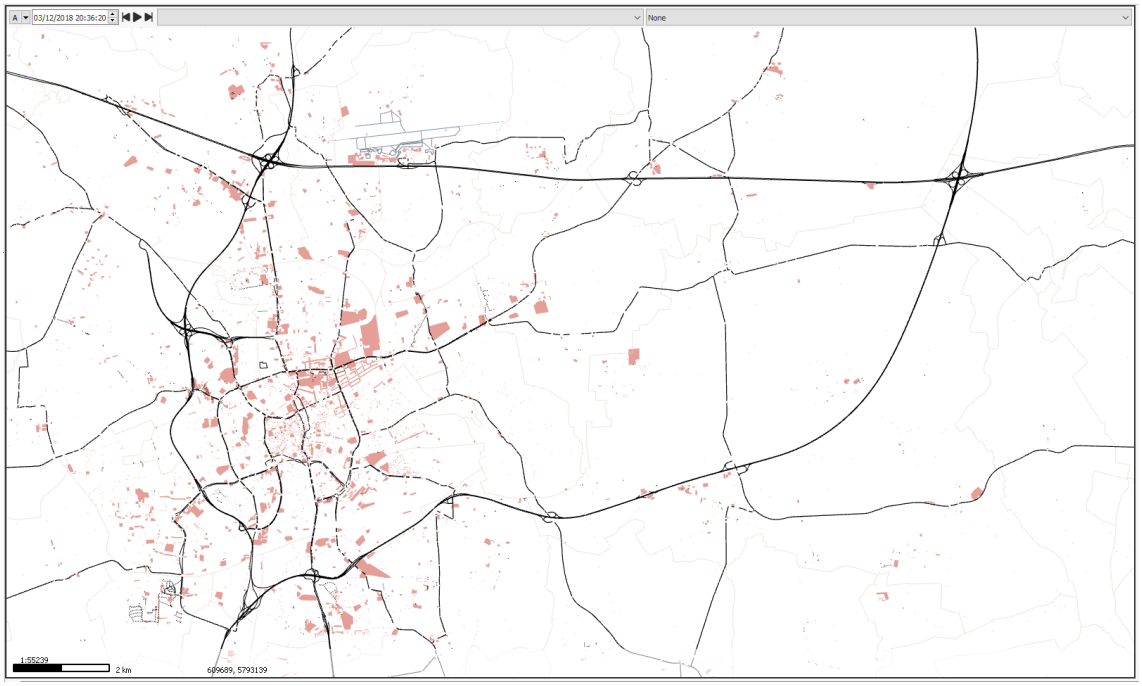

Abbildung 4: Hier wird zeigt das in der Simulationssoftware implementierte Straßennetz der Stadt Braunschweig gezeigt. Im Projekt wurde ein Teil dieses Verkehrsnetzes realisiert, der in den geplanten Demonstrationen Anwendung findet. In enger Zusammenarbeit mit den Partnern, die (teil-)autonome Fahrzeuge bereitstellen, wurden geeignete Straßenzüge für die Demonstrationsszenarien ausgewählt. Die Auswahl erfolgte so, dass die grundlegende Operational Design Domain (ODD) der Fahrzeuge mit den spezifischen Origin-Destination-Beziehungen (OD) der Straßenabschnitte übereinstimmt. Durch gezielt eingesetzte – teils künstlich erzeugte – Hindernisse werden Situationen geschaffen, in denen sich die OD-Beziehungen verändern, sodass die ODD der autonomen Fahrzeuge nicht mehr vollständig übereinstimmen und ein Re-Routing erforderlich wird.

Ein wesentlicher Schritt war die Ausarbeitung eines vollständigen Prozessmodells für das ODD-konforme Routing. Bernard war in der Entwicklung eines detaillierten Prozessflusses, der sämtliche Schritte von der initialen Routenanfrage bis zur berechneten, ODD-validierten Route beschreibt, involviert. Der Ansatz folgt einem iterativen Pipeline-Modell: Nach Eingang einer Anfrage klassifiziert der Routingdienst die relevanten Parameter, beschafft aktuelle Verkehrsdaten, integriert sie in ein mikroskopisches Verkehrsmodell, berechnet mögliche Alternativrouten und prüft diese anschließend gegen die definierten Operational Design Domains. Diese logische Struktur bildet die Grundlage für eine sichere und nachvollziehbare Entscheidungsfindung, bei der jede Route nicht nur nach Effizienz, sondern auch nach ODD-Kompatibilität bewertet wird.

Da die Bernard Technologies nicht über einen eigenen Routingdienst verfügt, wurde ursprünglich das eingesetzte Werkzeug zur Verkehrssimulation (Vissim und Aimsun USL) als provisorischer Routingdienst umfunktioniert. Von zentraler Bedeutung für diesen Routingansatz war die Entwicklung eines mikroskopischen Verkehrsmodells für den Demonstrationsstandort Braunschweig. Bernard modellierte hierzu ein realistisches Abbild des lokalen Straßennetzes, einschließlich Fahrstreifen, Kreuzungen, Verkehrsregeln, Tempolimits und relevanten Streckengeometrien (siehe Abbildung 4). Dieses Modell wurde nicht nur statisch ausgeführt, sondern dynamisch mit Echtzeitinformationen aus bestehenden Sensoren gespeist.

Zu Beginn wurde das Verkehrsmodell auf Basis statischer Daten aufgebaut, wobei die Struktur so gestaltet wurde, dass sie später durch das Überschreiben mit dynamischen Daten in beliebigen Dimensionen erweitert werden kann. Dieses Vorgehen war notwendig, da zu Projektbeginn noch nicht feststand, welche Infrastruktursensoren letztlich in den Use Case integriert werden würden. Auch die Verkehrsdaten selbst wurden zunächst statisch hinterlegt, um einerseits frühzeitig Offline-Tests durchführen zu können und andererseits, weil im gesamten Testraum nicht flächendeckend dynamische Infrastruktursensoren verfügbar waren. Zu diesem Zweck wurde eine einmalige Verkehrserhebung durchgeführt und in das Modell importiert.

Für die Echtzeitversorgung der Simulation mussten neue Schnittstellen zwischen den Infrastruktursensoren und dem Simulationsprogramm definiert und implementiert werden (siehe Abbildung 5). Auf Basis der eingehenden Sensordaten wurden die Simulationsparameter während des Betriebs automatisch angepasst (siehe Abbildung 6), und die Simulation konnte bei veränderten Verkehrsbedingungen dynamisch neu gestartet werden. Auf diese Weise entstand ein realitätsnaher digitaler Zwilling des Verkehrsgeschehens in der Stadt Braunschweig.

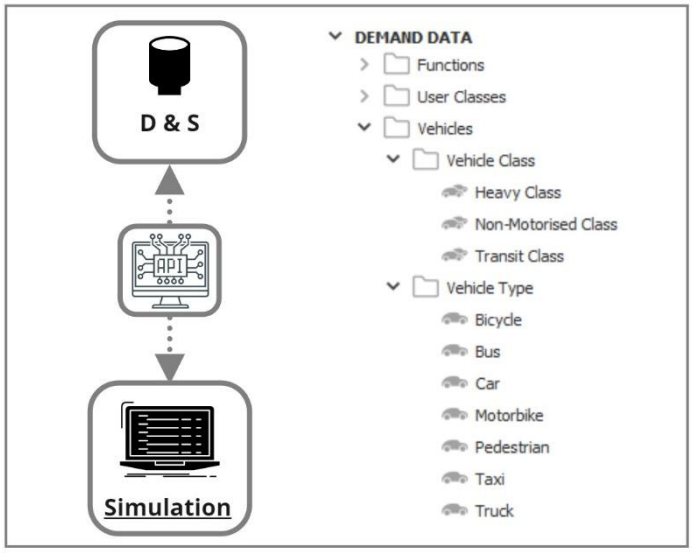

Abbildung 5: Schnittstelle zwischen Infrastruktursensoren und Simulationsmodell

```
# Variables used to configure this script

def exportODRoute( route, file ):
    file.write("%s;"%(route.getName()))
    for section in route.getRoute():
        file.write("%d;"%(section.getId()))
    file.write("\n")

# Entry code, the script starts here:

outputFile = "c:/tmp/odroutes.txt"
file = open( outputFile, 'w' )
if file != None:
    # Iterate over all odroutes in the network.
    odrouteType = model.getType( "GKODRoute" )
    for odroute in model.getCatalog().getObjectsByType( odrouteType ).values():
        exportODRoute( odroute, file )
    file.close()

print ("Done")
```

Abbildung 6: Reduzierung der Geschwindigkeit auf der Strecke (Aimsun USL)

Somit konnten Verkehrszustände realitätsnah rekonstruiert und in der Simulation fortgeschrieben werden. Dies bildete die notwendige Grundlage für sowohl zeitliche als auch sicherheitskritische Bewertungen im Routingprozess.

Parallel zur Modellierung widmete sich Bernard einerseits der Definition einer einheitlichen Routenanfrage, andererseits der Definition eines einheitlichen Routendatenformats, das innerhalb des Konsortiums abgestimmt und harmonisiert wurde (siehe Abbildung 7). Da die Projektpartner unterschiedliche Segmentierungslogiken und interne Darstellungsformen verwendeten, bestand eine zentrale Herausforderung darin, ein Format zu schaffen, das unabhängig von internen Datenstrukturen funktioniert. Bernard entwickelte hierfür ein JSON-basiertes Format, das die Geometrie der Route als LineString beschreibt. Vom Projektpartner wurden das Format durch strukturierte Annotationspunkte für Fahranweisungen sowie Metadaten zu Distanz, Fahrzeit und Status ergänzt. Dieses Format dient als neutrale, interoperable Basis, die sowohl von Routingdiensten als auch vom ODD-Matching und nachgelagerten Anwendungen verarbeitet werden kann. Dadurch wurde ein wesentlicher Schritt in Richtung eines modularen, föderativen Systems erzielt, wie es im Gaia-X-Kontext gefordert ist.

```
def createODRoute( cenConf ):
    odroute = GKSystem.getSystem().newObject( "GKODRoute", model )
    cenConf.addRoute( odroute )
    return odroute

def processFile( inputFile, cenconf ):
    for line in open( inputFile, "r" ).readlines():
        # take the value on each line
        tokens = line.split( ";" )
        # Reset the column counter
        i = 0
        route = createODRoute( cenconf )

        for entry in tokens:
            # First column contains the route name
            if i == 0:
                route.setName(entry)
            # the rest of columns are the route sections
            else:
                str = entry.strip()
                if len( str ) > 0:
                    section = model.getCatalog().find( int(entry) )
                    if section != None:
                        route.add( section, None )
                    else:
                        print ("Section %s does not exist. Route %s may not be imported correctly"%(entry, route.getName()))
            i = i + 1
        route.setStatus(GKObject.eModified)
```

Abbildung 7: Exemplarischer Import und Export von Quelle-Ziel-Routen in der Software AIMSUN (Aimsun USL).

Einen weiteren Beitrag leistete Bernard durch die Mitgestaltung des ODD-Matching-Prozesses, also der Bewertung von Routenabschnitten im Hinblick auf die Bedingungen, unter denen automatisierte Fahrsysteme betrieben werden dürfen. Hier arbeitete Bernard mit mehreren Konsortialpartnern zusammen, um Kriterienkataloge, Matchingregeln und Bewertungslogiken so abzustimmen, dass sie unabhängig von der internen Routenrepräsentation angewendet werden können. Das Ergebnis ist ein flexibles und erweiterbares Bewertungsmodell, das es ermöglicht, beliebige Streckenabschnitte nach ODD-Kriterien zu beurteilen und diese Bewertung für Routingentscheidungen zu nutzen.

Trotz des späteren Projektstopps im Routing-Teil wurden durch diese Vorarbeiten robuste technische Grundlagen geschaffen, die für zukünftige Implementierungen unmittelbar verwendet werden können. Die Verknüpfung aus Verkehrsmodell, standardisiertem Routenformat, ODD-Matching-Logik und Schnittstellenarchitektur stellt einen konsistenten, modularen Funktionsblock dar, der sich nahtlos in Gaia-X-fähige Mobilitätsdienste integrieren lässt. Bernard hat damit einen wichtigen Beitrag zur Weiterentwicklung datengetriebener Routingverfahren geleistet, die den Betrieb automatisierter Fahrzeuge sicherer, nachvollziehbarer und verlässlicher gestalten können.

3.4 Leitstellentaugliche Integrationen

Die Integration der im Projekt entwickelten Sensor-, Simulations- und Datenverarbeitungskomponenten in eine leitstellentaugliche Umgebung war ein wesentlicher Schritt, um die Funktionsfähigkeit der technischen Entwicklungen in einem realitätsnahen Anwendungsszenario nachzuweisen. Ziel war es, die vom infrastrukturseitigen Sensor generierten Ereignisse sowie die darauf aufbauenden Verkehrs- und Routinginformationen so aufzubereiten, dass sie direkt in den Entscheidungsprozess einer Leitstelle einfließen können.

Die Sensordaten wurden dabei in Echtzeit über die zuvor entwickelte Datenpipeline an die Leitstelle übermittelt. Da die Ereignisse bereits am Sensorknoten im OpenLABEL-Format erzeugt werden, stehen sie unmittelbar in einer strukturierten und maschinenlesbaren Form zur Verfügung. Die Leitstelle kann dadurch erkennen, um welches Ereignis es sich handelt, wo es auftritt, wie lange es gültig ist und welche Relevanz es für den laufenden Einsatz besitzt. Die präzise Übermittlung dieser Informationen ermöglicht eine deutlich schnellere und zuverlässigere Reaktion auf veränderte Verkehrssituationen.

Parallel dazu wurde die Simulation in den Leitstellenworkflow integriert. Die leitstellentaugliche Oberfläche erhielt Zugriff auf sowohl aktuelle als auch prädiktive Verkehrszustände, die aus der Kombination von Sensordaten und Modellberechnungen resultieren. Auf dieser Grundlage können mögliche Rettungsrouten bewertet werden, indem die Leitstelle sowohl die aktuelle Verkehrslage als auch die voraussichtliche Entwicklung berücksichtigt. Die Zusammenführung von Echtzeitereignissen, modellierten Verkehrsflüssen und ODD-relevanten Einschränkungen unterstützt damit eine fundierte und nachvollziehbare Entscheidungsfindung.

Für den Demonstrator wurden diese Systeme schließlich in einer einheitlichen Betriebsumgebung zusammengeführt. In den Szenarien der Abschlussdemonstration wurden typische Verkehrssituationen wie plötzliche Hindernisse, Stauentwicklungen oder die Annäherung eines Einsatzfahrzeugs nachgestellt. Die Leitstelle konnte die eintreffenden Ereignisse live verfolgen und darauf basierend aktualisierte Routenvorschläge einsehen. Auf diese Weise wurde gezeigt, dass die End-to-End-Kette, von der infrastrukturbasierten Wahrnehmung über die KI-gestützte Analyse und Simulation bis zur operativen Darstellung in der Leitstelle, zuverlässig funktioniert.

Die im Projekt aufgebauten Integrationsmechanismen verdeutlichen, dass Sensordaten aus einer Gaia-X-fähigen Infrastruktur ohne zusätzliche Aufbereitung in leitstellenrelevante Anwendungen überführt werden können. Damit entsteht eine tragfähige Grundlage für zukünftige Echtzeitdienste im Bereich der Rettungsmobilität und der automatisierten Verkehrsführung.

3.5 Demonstratoren & Projekterprobung

Die Demonstratoren spielten im Projekt Gaia-X 4 AMS eine zentrale Rolle, um die entwickelten technischen Komponenten unter realitätsnahen Bedingungen zu testen, ihre funktionale Reife zu überprüfen und den Nutzen der Systemarchitektur für unterschiedliche Mobilitätsanwendungen sichtbar zu machen. Die Bernard Technologies GmbH war hierbei maßgeblich beteiligt – sowohl bei der technischen Vorbereitung als auch bei der Durchführung und Präsentation der Demonstrationen für die Konsortialpartner, die Projektfamilie und externe Stakeholder.

Ein wesentlicher Baustein dieser Arbeiten war die Entwicklung eines Live-Demonstrators für die Hinderniserkennung und Verkehrsanalyse, der auf einem optischen Sensor basiert. Dieser Demonstrator zeigte eindrucksvoll, wie der Sensor in Echtzeit Verkehrsobjekte erkennt, klassifiziert und daraus strukturierte Ereignisse generiert. Über eine MQTT-basierte Datenpipeline wurden diese Ereignisse direkt an Visualisierungssysteme weitergeleitet und zusätzlich über Gaia-X-Konnektoren

föderiert verteilt, sodass die Daten sicher und kontrolliert zwischen den beteiligten Diensten ausgetauscht werden konnten. Dadurch ließ sich die Funktionsweise des Sensors äußerst transparent vermitteln – ein wichtiger Beitrag, um das Vertrauen in KI-gestützte Detektionssysteme zu stärken.

Darüber hinaus beteiligte sich Bernard aktiv an der Vorbereitung und Ausführung der Gesamtdemonstratoren, bei denen verschiedene Komponenten der Teilprojekte 4 und 5 in einer gemeinsamen Systemkette zusammengeführt wurden. In diesen Demonstrationen wurden Sensordaten, Simulationsmodelle und Routing- bzw. Priorisierungsdienste zusammengeführt, um Szenarien aus dem Rettungskorridor-Use-Case oder der ODD-validierten Routenplanung nachzustellen. Bernard war hierfür sowohl in der technischen Koordination als auch in der operativen Umsetzung verantwortlich, indem Schnittstellen abgestimmt, Szenarien vorbereitet und die Systeme vor Ort in Betrieb genommen wurden.

Eine besondere Stärke zeigte sich in der Integration der Sensordaten in simulative Umgebungen, welche die Grundlage für mehrere Demonstrationsszenarien bildeten. Die Überführung der Echtzeit-Ereignisse in makroskopische Simulationen ermöglichte es, Verkehrslagen realitätsnah nachzubilden und deren Auswirkungen auf potenzielle Routen zu veranschaulichen. Dieses Zusammenspiel wurde in projektinternen und projektfamilienweiten Workshops präsentiert und fand großen Anklang, da es die Leistungsfähigkeit digitaler Mobilitätsdienste überzeugend demonstrierte.

Bernard war zudem für die Bereitstellung eines interaktiven Routing-Demonstrators mitverantwortlich, der die Entwicklungsschritte in AP 4.2 visualisierte. Obwohl der Routingdienst als solcher im Konsortium später nicht weiterentwickelt wurde, war der Demonstrator in der Lage, die konzeptuelle ODD-Validierung und das Zusammenspiel zwischen Routen und ODD-Kriterien anschaulich zu vermitteln. Diese Visualisierung trug maßgeblich dazu bei, die technischen Entscheidungen aus der Konzeptphase verständlich zu machen und die Weiterentwicklungsoptionen greifbar aufzuzeigen.

Neben der Entwicklung und technischen Betreuung der Demonstratoren unterstützte Bernard auch deren Präsentation auf Veranstaltungen wie Projektfamilientreffen, Workshops und Messen. Die praxisnahe Darstellung der Sensorik, Simulationsmodelle und Routingkonzepte half dabei, die komplexen technischen Zusammenhänge des Projekts einem breiten Publikum zugänglich zu machen und den Mehrwert der entwickelten Lösungen in realistischen Anwendungsszenarien hervorzuheben.

Insgesamt trug Bernard mit seinen Demonstratoren entscheidend dazu bei, die Projektergebnisse sichtbar, erfahrbar und evaluierbar zu machen. Die Demonstrationen zeigten nicht nur die technische Reife der entwickelten Komponenten, sondern bildeten auch ein wichtiges Fundament, um deren Potenzial für zukünftige, Gaia-X-fähige Mobilitätsdienste praktisch zu validieren.

Abbildung 8: Modell zur Nachstellung von Hindernissen auf Straßen

3.6 Einbindung von Gaia-X über Atlas-X

Für die föderierte Bereitstellung und den sicheren Austausch von Verkehrsdaten wurde im Projekt Gaia-X 4 AMS eine Anbindung an die Gaia-X-Infrastruktur über Atlas-X realisiert. Ziel war es, Sensordaten und daraus generierte Ereignisse so bereitzustellen, dass autorisierte Dienste, insbesondere die Leitstelle, diese in Echtzeit nutzen können, ohne eine direkte Kopplung zu den Sensorknoten oder Backendsystemen herstellen zu müssen. Damit sollte ein zentraler Grundsatz von Gaia-X umgesetzt werden: Datenhoheit durch föderierte, kontrollierte und transparente Datenfreigabe.

Registrierung über Self Descriptions

Sowohl der datenbereitstellende Dienst als auch der datenempfangende Dienst melden sich bei Atlas-X über ihre jeweilige Self Description an. Diese beschreiben das jeweilige System, den Betreiber und die angebotenen bzw. angefragten Daten entsprechend den Anforderungen des Gaia-X-Trust-Frameworks.
Durch diese Registrierung wird in Atlas-X festgelegt, wer welche Daten unter welchen Bedingungen anfordern darf.

Access Request und Token-Erzeugung

Fordert ein externer Dienst, im Projekt insbesondere die Leitstelle, Zugriff auf Sensordaten oder Ereignisströme an, wird in Atlas-X ein Access Request erzeugt.
Dieser wird anhand der in der Self Description hinterlegten Policies geprüft. Im konkreten Gaia-X-4-AMS-Use Case wurde dabei ein Filter verwendet, der ausschließlich Leitstellen als berechtigte Konsumenten zulässt.

Wird der Access Request positiv bewertet, erstellt der datenbereitstellende Dienst automatisch ein zeitlich begrenztes Token. Dieses Token besteht aus einem spezifischen Benutzernamen und Passwort, die für genau diesen Zugriff generiert werden. Der Client (z. B. die Leitstelle) erhält diese Zugangsdaten über einen gesicherten Atlas-X-Kanal.

Zugriff auf den MQTT-Datenstrom

Nach Erhalt des Tokens kann sich die Leitstelle für die Dauer der Gültigkeit der Zugangsdaten am bereitgestellten MQTT-Stream anmelden und die Ereignisse abonnieren.
Damit wird kein direkter technischer Zugriff auf das Sensorsystem benötigt – stattdessen erfolgt die Datenfreigabe transparent, kontrolliert und jederzeit widerrufbar über Gaia-X.

Dieses Verfahren stellt sicher, dass:

- nur autorisierte Akteure Zugriff auf die Datenströme erhalten,
- alle Zugriffe nachvollziehbar und auditierbar sind,
- Datenflüsse föderiert und nicht zentralisiert werden,
- die Datenhoheit bei der datenbereitstellenden Partei verbleibt.

Visualisierung der Datenflüsse

Die folgende Abbildung zeigt die im Projekt umgesetzte Architektur der Gaia-X-Einbindung über Atlas-X, einschließlich Registrierung, Token-Erstellung und Anbindung an MQTT:

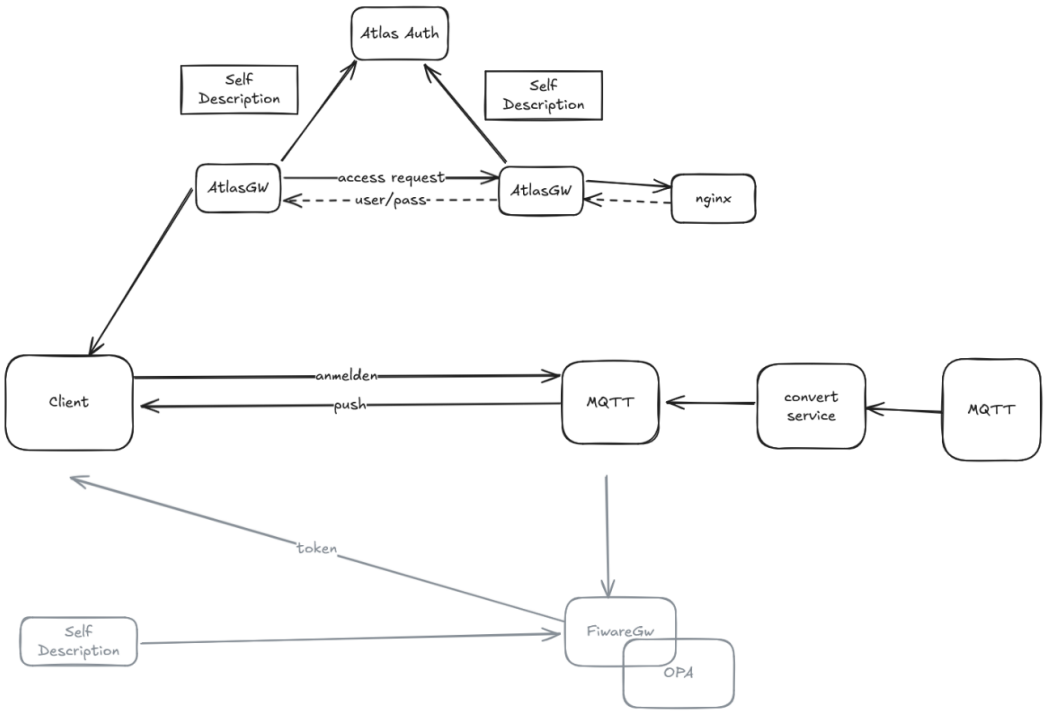

Abbildung 9: Architektur der Gaia-X Einbindung über Atlas-X

Bedeutung für zukünftige Mobilitätsdienste

Mit der Einbindung in Atlas-X wurde im Projekt ein zentraler Gaia-X-Mechanismus in einer realen Mobilitätsanwendung erprobt. Die Kombination aus Self Descriptions, Access Requests, Token-

basiertem Zugriff und föderierter Datenbereitstellung schafft die Grundlage dafür, dass zukünftige Mobilitätsdienste – etwa Leitstellen, Fahrzeughersteller oder Verkehrsbehörden – vertrauenswürdig, interoperabel und datenschutzkonform auf Echtzeitdaten zugreifen können.

Damit stellt die Atlas-X-Integration einen wichtigen Baustein für die Skalierbarkeit und Übertragbarkeit der Projektergebnisse über Gaia-X hinaus dar.

3.7 Beiträge zur technischen Dokumentation und Evaluation

Die Bernard Technologies GmbH hat im Projekt Gaia-X 4 AMS zentrale Beiträge zur technischen Dokumentation und Evaluation geleistet. Mehrere Ergebnisberichte wurden federführend erstellt oder maßgeblich mitgestaltet, wodurch die technischen Grundlagen, Schnittstellen, Anforderungen und Evaluierungsergebnisse konsolidiert und für das Gesamtprojekt nutzbar gemacht wurden.
Die folgenden Berichte stellen die wichtigsten dokumentarischen Beiträge dar:

Leitende Autorenschaft

- **TP4 – ODD Routing (Zusammenführung von E4.2.1 und E4.2.2)**
  (gemeinsam mit Oecon)
  Enthält die vollständige Anforderungsbeschreibung der Datenquellen und deren Schnittstellen sowie die Realisierung der Schnittstellen zwischen Infrastruktur, Backend, Simulation und Routing. Dieses Dokument bildet die technische Grundlage für den ODD-basierten Routingansatz im Teilprojekt 4.

- **E4.2.3 – ODD-basierte KI-Algorithmen für Verkehrsmanagement und -optimierung**
  Dokumentiert die KI-basierten Verfahren zur Ereigniserkennung, Verkehrsflussanalyse und ODD-basierten Bewertung von Routen. Dazu gehören Modellarchitekturen, Ontologien, Bewertungslogiken und Schnittstellen zum ODD-Matching.

- **Anforderungskatalog Sensorik und Datenquellen (Zusammenführung von E5.2.1 und E5.1.2)**
  (gemeinsam mit Feuerwehr Braunschweig)
  Enthält die vollständige Anforderungsanalyse für Sensorik, Datenquellen und Einsatzszenarien im Rettungskorridor-Use Case. Dieser Katalog diente als verbindliche Grundlage für die Entwicklung der infrastrukturseitigen Sensorik und die Ableitung der Use-Case-relevanten Datenflüsse.

- **E5.2.2 – Situationserfassung in Realkomponenten, erste Version an Gaia-X angeschlossen**
  Dokumentation der ersten funktionalen Integration der infrastrukturseitigen Sensordaten in Gaia-X, einschließlich Eventmodellen, Datenfluss, Atlas-X-Anbindung und Testkonfigurationen.

- **E5.2.3 – Evaluierungsbericht**
  Enthält die technische und funktionale Evaluation der Sensorik, der Datenpipeline, der Ereignisqualität, der Leitstellenintegration und der Einbindung in Simulation und Demonstrator.

Mitwirkung in weiteren Dokumenten

- **Verbundzwischenberichte und Verbundsabschlussbericht**
  Zulieferungen zu den Themen Sensorik, Datenarchitektur, Verkehrsmodell, ODD-Routing, Gaia-X-Anbindung, Demonstrator und technische Bewertung.

- **Beiträge zu weiteren Ergebnisberichten anderer Teilprojekte**
  Fachliche Unterstützung, Schnittstellenklärung sowie Bereitstellung sensor- und simulationsbezogener Inhalte.
- **Review und Qualitätssicherung fremder Berichte**
  Technisches Feedback, Konsistenzprüfung gegenüber Schnittstellen, Datenmodellen und Gaia-X-Anforderungen sowie Überprüfung der Gesamtarchitektur.

Durch diese Beiträge hat Bernard Technologies wesentlich zur technischen Konsistenz, Integrationsfähigkeit und Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse im Projekt Gaia-X 4 AMS beigetragen. Die Berichte bilden die dokumentarische Grundlage für mehrere zentrale Projektartefakte und unterstützen sowohl die technische Umsetzung als auch die wissenschaftliche und förderseitige Evaluierung.

3.8 Übergreifende technische Bewertung

Die im Projekt entwickelten technischen Komponenten – bestehend aus infrastrukturseitiger Sensorik, Datenpipelines, Simulationsmodellen, Routingbausteinen und der Gaia-X-Anbindung – wurden im Verlauf des Projekts sowohl separat als auch im Verbund erprobt. Die nachfolgende Bewertung fasst die Ergebnisse dieser Erprobungen aus systemischer Perspektive zusammen und ordnet sie hinsichtlich Reifegrad, Interoperabilität, Robustheit und Zukunftspotenzial ein.

Reifegrad und Funktionsfähigkeit (Technology Readiness)

Die optische Sensorik sowie die ergänzende akustische Erkennung erreichten im Rahmen der projektbezogenen Tests einen hohen funktionalen Reifegrad. Alle wesentlichen Funktionen konnten stabil in Echtzeit betrieben werden. Der Routingpfad blieb durch die strategische Entscheidung im Konsortium prototypisch, die zugrunde liegende Logik und die Simulationsintegration zeigten jedoch eine tragfähige technische Umsetzbarkeit. Insgesamt lässt sich die Systemlandschaft auf einem TRL zwischen 5 und 6 einordnen.

Interoperabilität der Daten- und Dienstschnittstellen

Besonders positiv hervorzuheben ist die Interoperabilität der Datenstrukturen. Durch die konsequente Nutzung standardisierter Formate (OpenLABEL, JSON, GeoJSON) konnten Sensordaten, Simulationsdaten und Ereignisströme ohne Anpassungen zwischen verschiedenen Systemen genutzt werden. Die entwickelten Schnittstellen erwiesen sich als hinreichend modular, um unterschiedliche Partnerdienste ohne strukturelle Anpassungen einzubinden.

Gaia-X-Konformität und föderierte Datenbereitstellung

Die Einbindung über Atlas-X demonstrierte, dass föderierte Nutzungskontrolle und datenschutzkonforme Datenfreigabe im Mobilitätskontext technisch umsetzbar sind. Die verwendeten Self-Descriptions und der Access-Request-Prozess zeigen, dass auch zeitkritische Dienste wie der MQTT-Ereignisstrom in ein Gaia-X-konformes Bereitstellungsmodell überführt werden können. Die erfolgreiche Token-basierte Zugriffssteuerung bestätigt die Anschlussfähigkeit an zukünftige föderierte Datenräume.

Robustheit und Betriebssicherheit

Die Überarbeitung der Hardware – insbesondere der Energieversorgung und Kühlung – führte zu einer stabilen und wetterunabhängigen Funktionsweise der Sensorik. Die Datenpipeline erwies sich im Dauerbetrieb als zuverlässig, und die Simulation konnte Ereignisse dynamisch und konsistent

verarbeiten. Herausforderungen verblieben bei der optischen Einsatzfahrzeugerkennung, die jedoch durch die ergänzende akustische Lösung adressiert werden konnte.

Gesamtsystemische Einordnung

Insgesamt zeigt die Bewertung, dass die entwickelten technischen Komponenten nicht nur als Einzelmodule funktionieren, sondern sich zu einem konsistenten, modularen Systemverbund integrieren lassen. Dies bildet eine solide Grundlage für weiterführende Arbeiten – etwa die Überführung der Sensorik in einen vollproduktiven Leitstellenbetrieb, die Erweiterung der Simulation um adaptives Routing oder die Einbindung zusätzlicher Gaia-X-Dienste.

4. Bewertung und Zielerreichung

Nach der detaillierten Darstellung der technischen Ergebnisse in Kapitel 3 folgt nun die übergreifende Bewertung der erreichten Ziele der Bernard Technologies GmbH im Projekt Gaia-X 4 AMS. Ziel dieses Kapitels ist es, die im Projektverlauf erzielten Entwicklungen kritisch einzuordnen, ihren Beitrag zu den Projektzielen zu bewerten und den Grad der Zielerreichung auf technischer wie strategischer Ebene nachvollziehbar darzustellen.

Dabei werden sowohl die ursprünglich in der Vorhabensbeschreibung formulierten Ziele als auch die im Projektverlauf entstandenen weiterführenden Anforderungen betrachtet. Die Bewertung erfolgt anhand der zentralen Kriterien:

- technische Zielerreichung,
- funktionale Reife der entwickelten Komponenten,
- Integration in das Gesamtökosystem von Gaia-X 4 AMS,
- Beitrag zur Vision eines souveränen, interoperablen Mobilitätsdatenraums,
- Relevanz für die Use Cases (ODD-Routing und Rettungskorridor),
- Praxisnähe, Anwendbarkeit und Übertragbarkeit der Ergebnisse,
- und der erreichte Technologiereifegrad (TRL).

Diese Betrachtung ermöglicht eine differenzierte Einordnung, wie weit die Arbeiten von Bernard die gesteckten Projektziele erfüllt, welche technischen und organisatorischen Herausforderungen erfolgreich bewältigt wurden und in welchen Bereichen zusätzliches Potenzial besteht.

Kapitel 4 schafft somit eine transparente Grundlage für den abschließenden Projektausblick und die Verwertungsstrategie, die in den folgenden Kapiteln beschrieben werden.

4.1 Erreichte Ziele vs. geplante Ziele

Die im Projekt Gaia-X 4 AMS durch die Bernard Technologies GmbH erzielten Ergebnisse entsprechen in hohem Maße den ursprünglich definierten Zielen der Vorhabensbeschreibung und erfüllen die wesentlichen Anforderungen der beiden adressierten Use Cases. Trotz einzelner strategischer Anpassungen im Konsortium – insbesondere hinsichtlich der vollständigen Umsetzung des Routingdienstes – konnte Bernard alle eigenen Arbeitspakete erfolgreich ausführen und in einigen Bereichen sogar über die ursprünglichen Zielvorgaben hinausgehende Resultate erzielen.

Ein zentrales Ziel bestand darin, KI-basierte Infrastruktursensorik zu entwickeln, die relevante Verkehrsinformationen in Echtzeit bereitstellen kann. Dieses Ziel wurde vollumfänglich erreicht: Der optische Sensor wurde im Projektverlauf deutlich weiterentwickelt und bietet nun eine robuste Echtzeiterkennung von Verkehrsteilnehmern, Hindernissen und Einsatzfahrzeugen. Damit wurde eine datengetriebene Grundlage geschaffen, die sowohl für den Rettungskorridor-Use Case als auch für ODD-basierte Routenentscheidungen essenziell ist.

Auch das Ziel, standardisierte, interoperable Datenmodelle und Schnittstellen für die Integration in föderierte Datenräume zu schaffen, wurde erreicht. Bernard implementierte OpenLABEL-basierte Ereignisformate, definierte JSON- und GeoJSON-Strukturen für Routen, Sensordaten und Verkehrsdaten und entwickelte klare Kommunikationsschnittstellen für die Anbindung an Backend- und Simulationssysteme. Diese Ergebnisse entsprechen exakt dem Projektziel, Gaia-X-kompatible Datenstrukturen aufzubauen, und schaffen eine zukunftsfähige Grundlage für spätere Föderationsdienste.

Im Bereich der Verkehrsmodellierung und Simulation wurden die geplanten Ziele ebenfalls vollständig erfüllt. Bernard entwickelte makroskopische und mikroskopische Verkehrsmodelle, die Echtzeitdaten

integrieren und für prädiktive Verkehrsanalysen genutzt werden können. Die Modelle wurden erfolgreich in Demonstratoren eingesetzt und tragen wesentlich zur Validierung der Use-Case-Logiken bei. Im Vergleich zur ursprünglichen Planung wurde hier sogar ein höherer Detaillierungsgrad erreicht, insbesondere in der Kombination von Echtzeit-Ereignissen und modellbasierten Prognosen.

Ein geplantes Ziel, das infolge einer Projektausweitung innerhalb des Konsortiums nur teilweise umgesetzt wurde, betrifft die vollständige Implementierung eines ODD-gestützten Routingdienstes. Während Bernard alle vorbereitenden Arbeiten – darunter das Prozessmodell, das Routenformat, die Datenquellenanalyse, die Schnittstellenspezifikation und die Abstimmung mit dem ODD-Matching – erfolgreich abgeschlossen hat, wurde der Routingdienst selbst im Gesamtprojekt nicht final implementiert. Dieser Umstand lag jedoch nicht in der Verantwortung von Bernard, sondern war das Ergebnis einer gemeinsamen Konsortialentscheidung, bestimmte Routingfunktionalitäten im Projektverlauf neu zu priorisieren. Aus Sicht der partnerspezifischen Zielerreichung gilt dieses Teilziel dennoch als inhaltlich erreicht, da alle Bernard zugeordneten Liefergegenstände vollständig ausgeführt wurden und die technischen Grundlagen für eine spätere Implementierung bereitstehen.

Im Bereich der Demonstration und Leitstellentauglichkeit wurden alle geplanten Ziele vollständig erreicht und teilweise übertroffen. Bernard konnte zeigen, dass die entwickelten Sensor-, Simulations- und Schnittstellenkomponenten in einer realitätsnahen Testumgebung zuverlässig und interaktiv eingesetzt werden können. Die erfolgreiche Präsentation mehrerer Demonstratoren auf verschiedenen Projektveranstaltungen sowie die operative Einbindung in Leitstellenprozesse dokumentieren die hohe technische Reife der Ergebnisse.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Bernard die geplanten Projektziele in nahezu allen Bereichen vollständig erreicht und teilweise übertroffen hat. Die entwickelten Komponenten sind technisch belastbar, interoperabel, praxistauglich und schaffen eine solide Grundlage für weiterführende Entwicklungen im Kontext von Gaia-X-basierten Mobilitätsdiensten.

4.2 Technologiereifegrad (TRL) vor und nach dem Projekt

Zu Beginn des Projekts Gaia-X 4 AMS befanden sich die von der Bernard Technologies GmbH entwickelten Sensorkomponenten, Analyseverfahren und Datenverarbeitungsarchitekturen auf einem frühen Technologiereifegrad. Die vorhandenen Systeme waren funktional erprobt, jedoch noch nicht für den operativen Einsatz im Kontext sicherheitskritischer Mobilitätsanwendungen geeignet. Insbesondere fehlten standardisierte Datenmodelle, robuste Integrationsschnittstellen, prädiktive Modelle sowie die Fähigkeit, Echtzeitdaten in komplexe, verkehrstechnische Entscheidungsprozesse einzubinden.

Im Ausgangszustand lagen die Kerntechnologien typischerweise im Bereich **TRL 3 bis TRL 4**:

- erste experimentelle KI-Modelle für Objekterkennung,
- funktionsfähige, aber noch nicht robuste Sensoreinheiten,
- initiale Verkehrsanalysen ohne Echtzeitkontext,
- fehlende Integration in Leitstellenprozesse und Simulationen,
- keine vorbereitete Einbindung in föderierte Datenräume wie Gaia-X.

Im Verlauf des Projekts wurde ein deutlicher Reifezuwachs erreicht, der auf mehreren technischen Fortschritten basiert:

1. **Reife und Stabilität der Sensorhardware**
   Durch robuste Gehäuse, Akkuintegration, angepasste Jetson-Plattformen und softwareseitige Optimierungen wurde der optische Sensor zu einem infrastrukturtauglichen Sensorknoten weiterentwickelt.

2. **Etablierte KI-basierte Erkennungsalgorithmen**
   Die eingesetzten neuronalen Netze wurden so verbessert, dass sie Verkehrsteilnehmer, Hindernisse und Einsatzfahrzeuge zuverlässig in Echtzeit erkennen können — einschließlich strukturierter Ereignisgenerierung.

3. **Echtzeitfähige Kommunikations- und Datenpipelines**
   Die Einführung von MQTT, standardisierten OpenLABEL-/JSON-Datenformaten und einem Backend zur Verarbeitung leitstellentauglicher Ereignisse erhöhte den Funktionsumfang und die Skalierbarkeit erheblich.

4. **Integration in Verkehrsmodelle und Simulationen**
   Die Fähigkeit, Sensordaten unmittelbar in makro- und mikroskopische Modelle zu integrieren, erhöhte den TRL im Bereich modellgestützter Analyse- und Prognoseverfahren signifikant.

5. **Demonstrierte Einbettung in operative Kontexte**
   Die Anbindung an LSA-Steuerlogiken, die Leitstellenintegration und die Demonstratoren belegen den Einsatz der Technologien unter realitätsnahen Bedingungen.

Am Projektende erreichten die Schlüsseltechnologien von Bernard einen **TRL von 6 bis 7**, abhängig vom jeweiligen Modul:

- **Sensorhardware & KI-Inferenz:** TRL 7
  → System wurde unter realitätsnahen Einsatzbedingungen demonstriert.
- **Echtzeit-Ereignisgenerierung & Datenmodelle:** TRL 6–7
  → Standardisierte Schnittstellen, stabile Ereignisübertragung, Demonstratorbetrieb.
- **Simulation & Modellkopplung:** TRL 6
  → Nachweis des integrierten Einsatzes in kontrollierter, praxisnaher Umgebung.
- **Routinggrundlagen & ODD-Bewertung:** TRL 4–5
  → Methodik und Schnittstellen vollständig spezifiziert, Routingdienst selbst jedoch nicht final integriert (konsortiale Entscheidung).

Insgesamt konnte Bernard die technologische Reife der eigenen Systemkomponenten deutlich erhöhen und mehrere Schlüsseltechnologien an die Schwelle des operativen Einsatzes heranführen. Die erreichten TRL-Werte dokumentieren, dass die entwickelten Lösungen nicht nur prototypisch funktionieren, sondern praktikabel, robust und unmittelbar weiterverwendbar sind — sowohl für zukünftige FuE-Initiativen als auch für realweltliche Pilotierungen im Mobilitätssektor.

4.3 Wissenschaftlich-technische Erkenntnisse

Im Projekt *Gaia-X 4 AMS* gewann die Bernard Technologies GmbH eine Vielzahl wissenschaftlich-technischer Erkenntnisse, die weit über die unmittelbaren Projektergebnisse hinausgehen. Diese Erkenntnisse betreffen sowohl die Anwendung KI-basierter Infrastruktursensorik im realen Verkehrsumfeld, die Kopplung von Sensordaten an simulationsbasierte Entscheidungsmodelle, als auch die Herausforderungen und Potenziale föderierter Mobilitätsdatenräume. Die Erfahrungen bieten eine solide Grundlage für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Mobilitätsbereich.

Eine zentrale Erkenntnis des Projekts ist die technische Machbarkeit und operationale Relevanz verteilter, KI-basierter Sensorik. Der optische Sensor zeigte, dass moderne neuronale Netze auch auf ressourcenbegrenzten Edge-Geräten zuverlässig arbeiten können und dass lokale Inferenz wesentlich dazu beiträgt, Latenzen zu minimieren und Datenschutzanforderungen einzuhalten. Die Fähigkeit,

Verkehrsszenen vollständig am Gerät auszuwerten, bestätigte nicht nur die Robustheit des Ansatzes, sondern verdeutlichte auch, wie wichtig es ist, Edge- und Cloud-Funktionalitäten intelligent zu kombinieren, um sowohl Reaktionsgeschwindigkeit als auch Skalierbarkeit sicherzustellen.

Eine weitere wichtige Erkenntnis betrifft die Einbindung heterogener Sensordaten in Verkehrssimulationen. Die direkte Übertragung strukturierter Ereignisse in makroskopische Modelle ermöglichte eine realistische und dynamische Abbildung der Verkehrslage. Dabei zeigte sich, dass die Qualität der Simulation entscheidend von der Aktualität und Genauigkeit der Eingangsereignisse abhängt. Die Fusion von Echtzeitdaten mit modellbasierten Prognosen erwies sich als besonders leistungsfähig – sowohl zur Detektion kritischer Situationen als auch zur Berechnung prädiktiver Rettungsrouten. Diese Kombination hebt simulationsgestützte Verkehrsanalyse auf ein neues Niveau und belegt das Potenzial datengetriebener Mobilitätssteuerung.

Im Rahmen von TP4 wurde deutlich, dass ODD-basierte Bewertungsketten eine hochkomplexe, aber essenziell notwendige Grundlage für automatisiertes Fahren darstellen. Die Entwicklung des einheitlichen Routendatenformats und der ODD-Matching-Logik zeigte, dass einheitliche semantische Modelle und konsistente Datenstrukturen dafür entscheidend sind. Die Abstimmung zwischen verschiedenen Partnern verdeutlichte jedoch auch, dass die Harmonisierung der Segmentierungslogiken eine nicht-triviale Herausforderung darstellt. Damit wurde ein wichtiges wissenschaftlich-technisches Learning gewonnen: Standardisierung ist nicht nur ein technischer, sondern vor allem ein kollaborativer Prozess.

Im Bereich der Rettungskorridorsteuerung zeigte sich, wie bedeutend Interoperabilität zwischen Sensorik, Leitstellentechnik und Verkehrssteuerung ist. Die Integration von Ereignisdaten in LSA-Steuergeräte bestätigte die prinzipielle Möglichkeit, relevante Verkehrsereignisse automatisiert in konkrete infrastrukturelle Maßnahmen zu überführen. Gleichzeitig wurde ersichtlich, dass bestehende LSA-Technologien und deren proprietäre Schnittstellen oft eine technische Einschränkung darstellen, die zukünftige Standardisierungsarbeiten erforderlich macht. Hier entsteht ein relevanter Forschungsbedarf bezüglich offener Steuerungsschnittstellen, die in zukünftigen Mobilitätsdatenräumen nahtlos eingebunden werden können.

Eine weitere Erkenntnis betrifft schließlich die Integration in Gaia-X-konforme Datenräume. Die Arbeiten zeigten, dass interoperable, semantisch reiche Datenmodelle wie OpenLABEL hervorragende Grundlagen für föderierte Datenräume bieten. Gleichzeitig wurde klar, dass der tatsächliche Betrieb von Föderationsdiensten nur dann gelingt, wenn alle Systemkomponenten, von der Sensorik über die Simulation bis hin zu Entscheidungsdiensten, konsistente Metadaten, eindeutige Identitäten und klar definierte Nutzungskontrollen implementieren. Diese Erfahrung verdeutlicht, dass Gaia-X mehr ist als eine technische Architektur: Es ist ein Ökosystem, das übergreifende Governance- und Vertrauensmechanismen benötigt, damit technische Innovationen wirksam werden können.

Zusammengefasst bestätigen die wissenschaftlich-technischen Erkenntnisse aus Gaia-X 4 AMS, dass moderne Mobilitätsdienste auf einer engen Verzahnung von KI-basierter Sensorik, modellbasierter Entscheidungsunterstützung und interoperabler Datenarchitektur beruhen. Bernard konnte im Rahmen des Projektes sowohl neue methodische Ansätze validieren als auch wesentliche Einsichten in die Herausforderungen eines föderierten Mobilitätsdatenraums gewinnen. Diese Erfahrungen bilden eine fundierte Grundlage für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich automatisierter, sicherheitskritischer und datengetriebener Mobilitätsanwendungen.

4.4 Beitrag zum Gaia-X-Ökosystem und zu Mobilitätsdatenräumen

Die im Projekt Gaia-X 4 AMS entwickelten Komponenten der Bernard Technologies GmbH leisten einen substantiellen Beitrag zur Weiterentwicklung des europäischen Gaia-X-Ökosystems. Durch die konsequente Anwendung offener Datenstandards, die Entwicklung interoperabler Schnittstellen und die Schaffung realitätsnaher Anwendungsfälle trägt Bernard dazu bei, die abstrakten Konzepte von Gaia-X — Föderation, Datenhoheit, Transparenz und Interoperabilität — in konkrete Mobilitätsanwendungen zu übersetzen.

Ein wesentlicher Beitrag besteht in der Entwicklung Gaia-X-fähiger Datenstrukturen und Ereignisformate. Die Nutzung von OpenLABEL, JSON- und GeoJSON-basierten Modellen ermöglicht eine nahtlose Übertragbarkeit der erzeugten Sensordaten in föderierte Datenräume. Diese standardisierten Formate bilden eine notwendige Grundlage für die Integration in Konnektoren und Self-Descriptions innerhalb eines Gaia-X-Ökosystems. Bernard hat damit gezeigt, wie Sensor-Edge-Geräte Daten in einem Format liefern können, das ohne weitere Transformationen für Datenräume, Entscheidungssysteme und Drittdienste nutzbar ist.

Von besonderer Bedeutung ist auch die Ausrichtung der Systeme auf föderierte Identitäts- und Vertrauensmechanismen. Indem Sensoren, Dienste und Ereignisse mit klaren Metadaten, Quellenangaben und Eigentumsinformationen versehen werden, folgt Bernard den grundlegenden Prinzipien des Gaia-X-Trust Frameworks. Diese Vorbereitungen sind entscheidend, um Daten in einem föderierten Kontext nutzbar zu machen, in dem Identität, Herkunft und Integrität der Daten transparent nachgewiesen werden müssen. Die entwickelten Konzepte für Sensor- und Diensteinbindung bilden daher einen praktischen Referenzbaustein für zukünftige Federation-Service-Implementierungen.

Ein dritter Kernbeitrag liegt in der Demonstration echter Mobilitätsdatenräume. Durch die Verbindung von Infrastruktur-Sensorik, Echtzeit-Ereignissen, makroskopischen und mikroskopischen Verkehrsmodellen sowie Entscheidungsdiensten hat Bernard gezeigt, wie sich dezentrale Datenquellen in einer offenen, modularen Architektur zusammenführen lassen. Die im Projekt entwickelte Datenpipeline (Sensor → Event → Backend → Simulation → Routing/LSA) steht exemplarisch für die Funktionsweise eines Mobilitätsdatenraums, wie ihn Gaia-X vorsieht: verteilte Datenquellen, interoperable Verarbeitungsschritte und transparente Entscheidungslogiken.

Nicht zuletzt leistete Bernard einen wichtigen Beitrag zur Praxisvalidierung von Gaia-X-Konzepten. Während viele Gaia-X-Aktivitäten noch theoretisch oder prototypisch bleiben, begegneten die Bernard-Systeme realen Bedingungen: schwankenden Netzwerken, heterogenen Datenströmen, komplexen Verkehrssituationen und operativen Anforderungen von Leitstellen. Diese praktische Erprobung ist entscheidend, denn sie zeigt, welche technischen und organisatorischen Voraussetzungen geschaffen werden müssen, damit föderierte Datenräume im Mobilitätssektor tatsächlich implementiert werden können — etwa robuste Edge-Analyse, standardisierte Ereignisformate, deterministische Schnittstellen und klare Governance-Regeln.

Insgesamt trägt Bernard Technologies mit seinen Arbeiten zu einer konkreten, praxisnahen und technisch fundierten Ausgestaltung des Gaia-X-Mobilitätsökosystems bei. Das Projekt demonstriert, wie föderierte Datenräume in sicherheitskritischen Anwendungen wie Rettungskorridoren oder automatisiertem Fahren genutzt werden können. Damit schafft Bernard nicht nur technologischen Mehrwert, sondern liefert auch wertvolle Impulse für Standardisierung, Interoperabilität und die europaweite Vernetzung digitaler Mobilitätsdienste.

4.5 Herausforderungen und Lessons Learned

Die Arbeiten von Bernard Technologies im Projekt Gaia-X 4 AMS waren geprägt von einer Vielzahl technischer, organisatorischer und konzeptioneller Herausforderungen, die gleichzeitig wertvolle Erkenntnisse für zukünftige Projekte im Bereich datengetriebener Mobilität lieferten. Die Auseinandersetzung mit heterogenen Systemlandschaften, föderierten Datenmodellen und realweltlichen Einsatzbedingungen ermöglichte es, zentrale Lessons Learned abzuleiten, die sowohl die technische Entwicklung als auch die Kollaboration in großen Forschungsverbünden nachhaltig beeinflussen.

Eine der zentralen Herausforderungen bestand in der Integration heterogener Datenquellen. Die Verbindung von optischer Edge-Sensorik, drohnenbasierten Messungen, Verkehrsmodellen und externen Informationsquellen erforderte eine sorgfältige Harmonisierung hinsichtlich Datenqualität, zeitlicher Auflösung, Repräsentationsformate und semantischer Strukturen. Es zeigte sich, dass die technische Integration nur dann robust funktioniert, wenn Datenformate früh standardisiert werden und klare Regeln zur Ereignisgenerierung, Metadatenstruktur und Synchronisation festgelegt sind. Dieses Learning betont die Bedeutung interoperabler Standards wie OpenLABEL und JSON, die im Projekt erfolgreich eingeführt wurden.

Auch die Echtzeitfähigkeit der Datenübertragung stellte hohe Anforderungen an Architektur und Implementierung. Insbesondere bei Ereignissen, die sicherheitskritische Entscheidungen betreffen, etwa die Erkennung eines Einsatzfahrzeugs oder eines Hindernisses, ist eine konsistente End-to-End-Latenz entscheidend. Die Erkenntnis hier: Edge-basierte KI-Inferenz ist für solche Anwendungsfälle unerlässlich, da sie Latenzen drastisch reduziert und gleichzeitig die Abhängigkeit von Netzwerkinfrastrukturen minimiert. Dies untermauert die Bedeutung verteilter Intelligenz als Schlüsselkomponente zukünftiger Mobilitätssysteme.

Eine weitere Herausforderung lag in der Interoperabilität der Routing- und ODD-Bewertungsverfahren. Schon früh wurde deutlich, dass unterschiedliche Partner unterschiedliche Segmentierungslogiken und interne Repräsentationen nutzen, die ohne einheitliche Modelle kaum kompatibel sind. Die umfangreiche Harmonisierung des Routendatenformats hat gezeigt, dass Standardisierung in solchen Ökosystemen weit mehr als ein technischer Akt ist: Sie ist ein kollaborativer, oft iterativer Prozess, der klare Kommunikation, Kompromissbereitschaft und ein gemeinsames Verständnis der funktionalen Anforderungen voraussetzt.

Im Bereich der Leitstellenintegration ergaben sich Herausforderungen aus den oft proprietären Schnittstellen existierender Verkehrsinfrastruktur. Während der optische Sensor in der Lage war, Ereignisdaten in standardisierten Formaten bereitzustellen, erforderte die Anbindung an bestehende LSA-Steuergeräte individuelle Anpassungen und intensive Abstimmungen. Dieses Learning verdeutlicht die Notwendigkeit langfristiger Standardisierungsinitiativen für Leitstellen- und Verkehrstechnik, um eine flächendeckende Interoperabilität künftig zu ermöglichen.

Darüber hinaus lieferte das Projekt wichtige Erkenntnisse über die Komplexität föderierter Datenräume. Die Integration von Sensoren, Diensten und Simulationskomponenten in ein Gaia-X-kompatibles Ökosystem ist technologisch anspruchsvoll und setzt klare Governance- und Trust-Modelle voraus. Eine zentrale Erkenntnis ist, dass technische Komponenten ohne transparente Metadaten, eindeutige Identitäten und klar definierte Nutzungsrichtlinien nicht sinnvoll in Föderationsdienste eingebunden werden können. Das Projekt zeigte deutlich, dass Gaia-X nicht nur technische Infrastruktur erfordert, sondern ein übergreifendes Verständnis von Datenhoheit, Datenkatalogisierung und föderierter Dienstbeschreibung.

Schließlich erwies sich die Demonstration unter realen Bedingungen als wertvolle Lernquelle. Unvorhergesehene Effekte wie schwankende Konnektivität, variable Lichtverhältnisse oder dynamische Verkehrssituationen legten offen, wie wichtig robuste Designs, Fehlertoleranzmechanismen und kontinuierliche Validierung sind. Gleichzeitig bestätigte der erfolgreiche Betrieb der Sensoren und Modelle im Feld, dass die gewählte technische Architektur tragfähig, skalierbar und für zukünftige Piloteinsätze geeignet ist.

Zusammengefasst verdeutlichen die Herausforderungen und Lessons Learned aus Gaia-X 4 AMS, dass die Entwicklung datenbasierter Mobilitätssysteme ein Zusammenspiel aus technologischer Exzellenz, Standardisierung, interdisziplinärer Zusammenarbeit und praxisnaher Validierung erfordert. Die Erkenntnisse stärken nicht nur die technische Basis zukünftiger Projekte, sondern liefern auch strategische Impulse für die Weiterentwicklung föderierter Mobilitätsdatenräume.

5. Verwertung und Ausblick – Einleitung

Die im Projekt *Gaia-X 4 AMS* entwickelten Technologien, Methoden und Demonstratoren der Bernard Technologies GmbH bilden eine substanzielle Grundlage für die zukünftige Weiterentwicklung datengetriebener Mobilitätsdienste. Mit der erfolgreichen Kombination aus KI-basierter Infrastruktursensorik, modellgestützter Verkehrsanalyse, ODD-gestützten Bewertungsmethoden und interoperablen Datenarchitekturen hat Bernard Kompetenzen aufgebaut, die unmittelbar in bestehende Geschäftsfelder übertragen und zugleich als Ausgangspunkt für neue Produkte, Dienstleistungen und Forschungsaktivitäten genutzt werden können.

Zentral ist dabei, dass die entwickelten Lösungen nicht nur prototypischen Charakter besitzen, sondern bereits eine technologische Reife erreicht haben, die den Einsatz in realen Mobilitätsumgebungen ermöglicht. Dies eröffnet vielfältige Verwertungsmöglichkeiten – sowohl im Kontext zukünftiger Smart-City-Projekte, bei der Modernisierung städtischer Verkehrsinfrastruktur als auch im Bereich automatisierter Mobilität. Darüber hinaus stärkt das Projekt die Position von Bernard als innovationsgetriebener Anbieter im Feld digitaler Verkehrsanalytik und vernetzter Mobilitätssysteme.

Im folgenden Kapitel werden die geplanten Verwertungsstrategien, die wirtschaftliche Relevanz der Projektergebnisse, potenzielle Anwendungsszenarien sowie die Identifikation weiterer FuE-Potenziale systematisch beschrieben. Zugleich wird ein Ausblick gegeben, welche strategischen Schritte erforderlich sind, um die entwickelten Technologien langfristig in skalierbare, marktnahe Lösungen zu überführen und welche Rolle Gaia-X in diesem zukünftigen Ökosystem spielen kann.

5.1 Interne Nutzung und Verwertung bei Bernard

Die im Rahmen von Gaia-X 4 AMS entwickelten Technologien, Verfahren und Erkenntnisse leisten einen unmittelbaren Beitrag zur internen Weiterentwicklung der Bernard Technologies GmbH. Sie stärken bestehende technische Kompetenzen, verbessern Entwicklungsprozesse und bilden eine solide Grundlage für zukünftige Forschungs- und Innovationsaktivitäten des Unternehmens.

Ein wesentlicher interner Verwertungspfad ergibt sich aus den Fortschritten in der KI-basierten Infrastruktursensorik. Die im Projekt erreichten Verbesserungen in Klassifikation, Ereignisgenerierung, Hardwareintegration und Energieversorgung fließen direkt in die interne Sensorentwicklung ein. Dies betrifft insbesondere die Weiterentwicklung der algorithmischen Pipeline, die Steigerung der Robustheit im Dauerbetrieb sowie die Implementierung verbesserter Test- und Validierungsroutinen. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse erleichtern zudem die Integration zusätzlicher Sensormodalitäten – beispielsweise akustischer Erkennungsmethoden – in bestehende Entwicklungsprozesse.

Auch im Bereich der Datenverarbeitung und Systemarchitektur ergeben sich erhebliche interne Synergien. Die Einführung standardisierter, interoperabler Datenmodelle (z. B. OpenLABEL-, JSON- und GeoJSON-Strukturen) und die im Projekt ausgearbeitete Ereignispipeline haben die interne Softwareentwicklung nachhaltig beeinflusst. Sie ermöglichen künftig eine effizientere Gestaltung von Datenflüssen, erleichtern interne Tests und fördern ein einheitliches Architekturverständnis im Unternehmen. Besonders wertvoll ist die Etablierung einer modularen, klar strukturierten Schnittstellenarchitektur, die nun als Grundlage für interne Entwicklungsstandards dienen kann.

Die Entwicklung und Einbindung mikroskopischer und makroskopischer Verkehrsmodelle führt zu einer nachhaltigen Erweiterung des internen Methodenspektrums. Bernard verfügt nun über erprobte interne Werkzeuge, um Sensordaten in Verkehrsmodelle einzubinden, Verkehrsszenarien abzuleiten und dynamische Entwicklungen zu simulieren. Diese Expertise verbessert interne

Evaluationsprozesse und erlaubt eine genauere Analyse von Systemverhalten in frühen Entwicklungsphasen.

Ein weiterer wichtiger interner Nutzen ergibt sich aus der im Projekt aufgebauten Kompetenz rund um föderierte Datenräume und Gaia-X. Die umfassenden Erfahrungen mit Self Descriptions, Identitätskonzepten, Access-Request-Mechanismen und Datenhoheit stärken die Fähigkeit des Unternehmens, künftig komplexe Datenraumarchitekturen zu konzipieren und in F&E-Projekten umzusetzen. Dieses Know-how wird intern bereits genutzt, um Prozesse für die Datenbeschreibung, Zugriffssteuerung und Vertrauensketten zu standardisieren.

Zusammengefasst führen die im Projekt Gaia-X 4 AMS erzielten Fortschritte zu einer nachhaltigen Stärkung der internen technologischen Basis von Bernard Technologies. Die gewonnenen Erkenntnisse verbessern Entwicklungsprozesse, vertiefen zentrale Kompetenzen in den Bereichen Sensorik, Datenarchitektur, Simulation und Datenraumtechnologie und bilden damit die Grundlage für zukünftige Innovationen im Unternehmen.

5.2 Wirtschaftliche Verwertungspotenziale

Die im Projekt Gaia-X 4 AMS entwickelten Technologien eröffnen für die Bernard Technologies GmbH bedeutende wirtschaftliche Perspektiven in mehreren zentralen Marktsegmenten. Durch die Weiterentwicklung der KI-basierten Infrastruktursensorik, die Etablierung interoperabler Datenpipelines und die Nutzung föderationsfähiger Architekturen entstehen neue Produkt- und Dienstleistungsangebote, die kurz- und mittelfristig am Markt positioniert werden können.

Ein unmittelbares wirtschaftliches Potenzial ergibt sich im Bereich der verkehrsbezogenen Sensordienstleistungen. Die im Projekt erreichte Fähigkeit, Verkehrsteilnehmer in Echtzeit zu erkennen, Ereignisse lokal zu generieren und strukturierte Daten bereitzustellen, stärkt die Position des Sensors als marktfähiges Produkt für Kommunen, Verkehrsbehörden, Infrastrukturbetreiber und Mobilitätsdienstleister. Besonders relevant sind Anwendungen wie ereignisorientierte Verkehrssteuerung, Erfassung des ruhenden Verkehrs, automatisierte Störungserkennung sowie Analyse sicherheitskritischer Situationen im urbanen Raum.

Auch die im Projekt entwickelten interoperablen Datenmodelle und Schnittstellen bieten einen erheblichen wirtschaftlichen Mehrwert. Kommunen und Smart-City-Akteure stehen zunehmend vor der Herausforderung, heterogene Systeme zu vernetzen und konsistente Datenräume aufzubauen. Die von Bernard ausgestalteten OpenLABEL-Eventstrukturen sowie standardisierte JSON- und GeoJSON-Modelle eignen sich hierfür als marktfähige Bausteine und ermöglichen eine schnelle Integration in bestehende Smart-City-Infrastrukturen. Dadurch lassen sich neue datengetriebene Geschäftsmodelle verwirklichen – etwa Analysedienste, Monitoringlösungen oder modulare Erweiterungen für bestehende Verkehrsmanagementsysteme.

Ein weiteres wirtschaftliches Potenzial entsteht im Bereich der Verkehrsmodellierung und -simulation. Die Fähigkeit, Echtzeitdaten in mikroskopische und makroskopische Modelle zu integrieren, verschafft Bernard einen Wettbewerbsvorteil bei Infrastrukturplanungen, Mobilitätsstudien und Evaluierungen verkehrlicher Maßnahmen. Diese Methodik ist insbesondere für öffentliche Auftraggeber, Ingenieurbüros und Verkehrsbehörden attraktiv, die zunehmend datenbasierte Entscheidungsgrundlagen nachfragen.

Darüber hinaus ergeben sich wirtschaftliche Chancen im Umfeld leitstellentauglicher Entscheidungsunterstützungssysteme. Die im Projekt entwickelten Mechanismen zur Detektion von Störungen, zur Priorisierung von Einsatzfahrzeugen und zur Integration in Lichtsignalanlagen ermöglichen die Entwicklung kommerzieller Lösungen für Leitstellen, Feuerwehren und kommunale

Verkehrsbehörden. Auf Basis der Projektartefakte lassen sich sowohl eigenständige Module als auch integrierte Systeme zur Einsatzunterstützung realisieren.

Langfristig eröffnen die im Projekt erworbenen Kompetenzen im Bereich föderierter Datenräume erhebliche strategische Marktchancen. Mit der zunehmenden Verbreitung von Datenraumtechnologien im öffentlichen Sektor steigt der Bedarf an interoperablen Sensoren, Datenquellen und Diensten, die Gaia-X-konform betrieben werden können. Bernard verfügt durch seine aktive Beteiligung an Gaia-X 4 AMS über das technische Fundament, künftig als Datenprovider, Integrationspartner oder Dienstanbieter in föderierten Mobilitätsökosystemen aufzutreten.

Zusammenfassend ermöglichen die im Projekt gewonnenen Technologien und Erkenntnisse eine Erweiterung des Produktportfolios, die Erschließung neuer Geschäftsfelder und eine langfristige Marktpositionierung im Bereich digitaler und datengetriebener Mobilitätstechnologien. Die wirtschaftlichen Verwertungspotenziale reichen dabei deutlich über das Projektende hinaus und bieten die Grundlage für nachhaltiges Wachstum der Bernard Technologies GmbH.

5.3 Weiterführende Forschungs- und Entwicklungsansätze

Die im Projekt Gaia-X 4 AMS erzielten Ergebnisse verdeutlichen das Potenzial einer interoperablen, datengetriebenen Mobilitätsinfrastruktur und zeigen zugleich mehrere Ansatzpunkte für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

Ein Schwerpunkt zukünftiger FuE-Aktivitäten liegt in der Weiterentwicklung der KI-basierten Infrastruktursensorik. Moderne Verfahren wie selbstüberwachtes Lernen, Domain Adaptation oder multimodale Sensordatenfusion könnten die Wahrnehmungsleistung weiter erhöhen, insbesondere unter schwierigen Umweltbedingungen. Ebenso eröffnen kooperative Sensornetzwerke neue Möglichkeiten für eine robuste, verteilte Umfeldanalyse.

Auch im Bereich föderierter Mobilitätsdatenräume besteht weiterer Forschungsbedarf. Das Projekt hat gezeigt, dass Gaia-X-Prinzipien grundsätzlich sinnvoll und technisch umsetzbar sind, der praktische Nutzen jedoch erst entsteht, wenn viele Unternehmen aktiv Daten und Dienste bereitstellen. Derzeit dominieren Forschungsinstitute und Pilotsysteme, weshalb reale Anwendungsfälle noch begrenzt sind. Zukünftige Arbeiten sollten daher die Senkung von Einstiegshürden für Unternehmen, die Automatisierung von Self-Descriptions sowie den praktischen Einsatz von Usage-Control-Mechanismen adressieren. Förderprogramme sind ein wichtiger Hebel, um eine breitere industrielle Teilnahme an Datenräumen zu ermöglichen.

Im Bereich prädiktiver Verkehrsmodelle bieten adaptive, KI-gestützte und hybride Modellansätze weiteres Potenzial, um Verkehrszustände präziser vorherzusagen und dynamische Szenarien – etwa für automatisierte Mobilität – realistisch abzubilden. Ergänzend ergeben sich Forschungsfelder in der Entwicklung kooperativer Mobilitätsdienste, etwa Infrastrukturassistenz für automatisierte Fahrzeuge oder digitale Zwillinge des Verkehrs in Echtzeit.

Schließlich bestehen Entwicklungsansätze in der automatisierten Verarbeitung von Ereignisdaten für Leitstellen sowie im Transfer der im Projekt entwickelten Technologien auf multimodale urbane Mobilitätssysteme, etwa im Fuß- und Radverkehr oder im ÖPNV.

Zusammenfassend markiert Gaia-X 4 AMS für Bernard Technologies einen Ausgangspunkt für vielfältige weitere FuE-Aktivitäten: von der KI-basierten Sensorik über hybride Verkehrsmodelle bis hin zu skalierbaren Mobilitätsdatenräumen, die langfristig zu einer vernetzten und kooperativen Mobilität beitragen können.

6. Zusammenfassung und Schluss

Das Projekt Gaia-X 4 AMS hat eindrucksvoll gezeigt, welches Potenzial in der Verbindung von KI-basierter Infrastruktursensorik, datengetriebenen Verkehrsmodellen und föderierten Datenarchitekturen liegt. Die Bernard Technologies GmbH konnte in diesem Umfeld zentrale technologische Beiträge entwickeln, die das Verständnis moderner Mobilitätsdatenflüsse deutlich erweitern und die Grundlage für interoperable, skalierbare Mobilitätssysteme schaffen.

Im Verlauf des Projekts wurde die infrastrukturseitige Sensorik substantiell weiterentwickelt und um KI-basierte Analyseverfahren, robuste Hardwarekomponenten und ereignisorientierte Datenstrukturen ergänzt. Die enge Verzahnung mit Verkehrsmodellen und Entscheidungsdiensten ermöglichte die Entwicklung eines durchgängigen Datenflusses – von der Erfassung realer Verkehrszustände bis hin zur Bewertung von Routen und Szenarien in Echtzeit. Gleichzeitig wurden zentrale Gaia-X-Elemente wie föderierte Identitäten, Self-Descriptions und kontrollierte Datenzugriffe praktisch erprobt und in Demonstrationsumgebungen sichtbar gemacht.

Die im Projekt aufgebauten Demonstratoren haben gezeigt, dass die entwickelten Komponenten nicht nur im Labor funktionieren, sondern auch unter realen Bedingungen zuverlässig eingesetzt werden können. Dabei wurde deutlich, dass Echtzeitfähigkeit, Interoperabilität und standardisierte Datenmodelle essenziell sind, um sensorbasierte Dienste in komplexe Mobilitätsumgebungen einzubetten und einen verlässlichen Informationsfluss für Anwendungen wie ODD-Matching, Verkehrsprognosen oder Rettungskorridorprozesse sicherzustellen.

Ein wesentliches Ergebnis des Projekts ist zudem die Erkenntnis, dass föderierte Datenräume wie Gaia-X technisch realisierbar und für Mobilitätsanwendungen grundsätzlich geeignet sind, ihr volles Potenzial jedoch erst entfalten, wenn eine breite Beteiligung unterschiedlicher Unternehmen und Systembetreiber gewährleistet ist. Gaia-X 4 AMS hat hierzu wichtige Grundlagen geschaffen, aber auch gezeigt, dass Förderprogramme eine zentrale Rolle spielen, um Firmen aktiv in einen Datenraum zu integrieren und Ökosysteme über Forschungseinrichtungen hinaus zu öffnen.

Insgesamt konnte Bernard Technologies seine technologische Basis im Bereich intelligenter Verkehrssysteme deutlich stärken. Die entwickelten Methoden, Datenmodelle und Architekturen bilden eine solide Grundlage für zukünftige Weiterentwicklungen in den Bereichen Sensorik, Simulation, Leitstellenintegration und Datenraumtechnologien. Die Projektergebnisse fließen bereits in interne Entwicklungsprozesse ein und schaffen die Voraussetzung dafür, die nächsten Schritte hin zu kooperativen, sicheren und datengetriebenen Mobilitätssystemen aktiv mitzugestalten.

Mit dem Abschluss des Projekts endet daher nicht die technische Entwicklungsarbeit, sondern es beginnt eine Phase der zielgerichteten Weiterentwicklung, Verwertung und Skalierung. Bernard Technologies wird die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse nutzen, um innovative Mobilitätsdienste voranzutreiben und zur Realisierung eines interoperablen, sicheren und zukunftsfähigen Mobilitätsökosystems beizutragen.

Anhang A: Meetings, Konferenzen etc:

Konsortialtreffen Braunschweig, 21.-22.6.2022

Die BERNARD Technologies war beim Hybriden Konsortialtreffen in Braunschweig mit zwei Mitarbeitern vor Ort um die zwei Hauptaufgabengebiete unsererseits, infrastrukturseitige Sensorik und dynamische Routenplanung, bei den Diskussionen abzudecken. In diesem Treffen wurden einerseits die Ergebnisse der einzelnen Teilprojekte präsentiert, andererseits die Verbindungen zwischen diesen Teilprojekten abgeklärt. Besonders für die Verbindung und den Austausch von den TP1-3 und den Demonstratoren TP4-5 war dieses Treffen wichtig und ergiebig, da die Definitionen von Consumer, Federator und Provider mit Bezug auf Gaia-X geschärft wurden. Zusätzlich wurden diese Gaia-X Participants auf bereits bestehende Anwendungsfälle aus TP4 und TP5 beispielhaft zugeordnet.

Konsortialtreffen Online, 10.-11.11.2022

Die BERNARD Technologies war beim online Konsortialtreffen dabei um die zwei Hauptaufgabengebiete unsererseits, infrastrukturseitige Sensorik und dynamische Routenplanung, bei den Diskussionen abzudecken.

In diesem Treffen wurden einerseits die Ergebnisse der einzelnen Teilprojekte präsentiert, andererseits die Verbindungen zwischen diesen Teilprojekten abgeklärt. Die abgeschlossenen und anstehenden Meilensteine wurden diskutiert, um den Meilensteinbericht zu finalisieren. Außerdem wurden die Zwischenergebnisse für die Vorstellung gegenüber dem Projektträger abgestimmt. Zusätzlich wurde bei diesem Konsortialtreffen das Projekt Management Office (PMO) vorgestellt und Fragen diesbezüglich abgeklärt.

TP4 Workshop Berlin DLR, 1.12.2022

Die BERNARD Technologies war beim live Workshop in Berlin für das TP4 mit einem Mitarbeiter vor Ort um die zwei Hauptaufgabengebiete unsererseits, infrastrukturseitige Sensorik und dynamische Routenplanung, bei den Diskussionen abzudecken.

Dieser Workshop wurde zur Finalisierung des Swimlane-Diagramms zur Abhandlung der Use-Cases von TP4 abgehalten. Dadurch konnten die einzelnen Services und die Kommunikation zwischen den Services definiert werden. Weiters wurde der Demonstrator konkretisiert und skizziert.

Im Speziellen war für die BERNARD Technologies die Abstimmung der Kartendienste zwischen Oecon, DLR und uns wichtig für die Realisierung eines genormten Routendienstes. Hier wurde die verschiedene Segmentierung der Routen besprochen und Lösungsansätze für ein einheitliches Format erarbeitet. Des Weiteren wurde das ODD – OD Matching konkretisiert und dessen Einbindung in den ODD Routendienst besprochen. Hier werden nun die einzelnen Sektoren einer Route vom Routingservice anhand ihrer ODD Eigenschaften bewertet und an den Routendienst zurückgeschickt. Dies wird solange wiederholt, bis eine ODD konforme Alternative gefunden wird.

Konsortialtreffen Braunschweig, 14.-15.06.2023

Die BERNARD Technologies nahm am Konsortialtreffen in Braunschweig teil, um ihre beiden Hauptaufgabenbereiche, infrastrukturseitige Sensorik und dynamische Routenplanung, in den Diskussionen abzudecken. Während des Treffens wurden die Ergebnisse der einzelnen Teilprojekte präsentiert und die Verbindungen zwischen ihnen geklärt. Es sind die abgeschlossenen und anstehenden Meilensteine besprochen worden, um den Meilensteinbericht abzuschließen und die

nächsten Arbeitspakete zu planen. Zusätzlich wurden die Zwischenergebnisse für die Vorstellung gegenüber dem Projektträger abgestimmt.

Market-X Veranstaltung Wien DLR, 14.-15.3.2023

Die BERNARD Technologies nahm an der Market-X Konferenz und Expo in Wien teil, die vom gaia-X Hub Austria organisiert wurde. Wir waren zusammen mit anderen Partnern für den Stand Gaia-X 4 Future Mobility verantwortlich, insbesondere für die Betreuung des Gaia-X 4 AMS. Während der Veranstaltung führten wir erfolgreiche Gespräche, die dazu beitragen werden, die Schnittstellen über Gaia-X in Zukunft optimal zu implementieren.

Konsortialtreffen Braunschweig, 26.-28.10.2023

Die BERNARD Technologies nahm am Konsortialtreffen in Braunschweig teil, um ihre beiden Hauptaufgabenbereiche, infrastrukturseitige Sensorik und dynamische Routenplanung, in den Diskussionen abzudecken. Während des Treffens wurden die Ergebnisse der einzelnen Teilprojekte präsentiert und die Verbindungen zwischen ihnen geklärt. Es sind die abgeschlossenen und anstehenden Meilensteine besprochen worden, um den Meilensteinbericht abzuschließen und die nächsten Arbeitspakete zu planen. Zusätzlich wurden die Zwischenergebnisse für die Vorstellung gegenüber dem Projektträger abgestimmt.

Bei diesem Konsortialtreffen wurden die einzelnen MVDs und deren funktionsweise getestet und demonstriert. Die BERNARD Technologies hat ihr Modell zur Hindernisdetektion vorgestellt und ausgestellt.

Konsortialtreffen online, 05.-06.03.2024

Die BERNARD Technologies nahm am Konsortialtreffen dieses Mal krankheitsbedingt online teil, um ihre beiden Hauptaufgabenbereiche, infrastrukturseitige Sensorik und dynamische Routenplanung, in den Diskussionen abzudecken. Während des Treffens wurden die Ergebnisse der einzelnen Teilprojekte präsentiert und die Verbindungen zwischen ihnen geklärt. Es sind die abgeschlossenen und anstehenden Meilensteine besprochen worden, um den Meilensteinbericht abzuschließen und die nächsten Arbeitspakete zu planen. Zusätzlich wurden die Zwischenergebnisse für die Vorstellung gegenüber dem Projektträger abgestimmt.

Besonders die Organisation und der Ablauf der Hannover Messe, and dem ein eigener Gaia-X Stand angemietet war stand im Fokus dieses Meetings.

Messe Hannover 22. – 26.04.2024

Bei der diesjährigen Hannover Messe war Gaia-X 4 AMS als teil der Projektfamilie mit einem Stand vertreten. Die Bernard Technologies GmbH war neben der Organisation auch aktiv am 24.04.2024 als Standbetreuer involviert.

Neben dem großen Interesse der Messebesucher am Thema wird besonders der Austausch mit der Projektfamilie hervorgehoben, der wertvolle Themen und Impulse für Gaia-X hervorgebracht hat.

Vehicle Strike Symposium Australia 20. – 22.05.2024

Bei einem Symposium in Australian bezüglich Unfälle zwischen Verkehr und Tiere wurde die Bernard Technologies GmbH als Sprecher für einem Vortrag und einem anschließenden Workshop eingeladen. Hier wurden ein Teile der Ergebnisse aus diesem Förderprojekt präsentiert, wie mithilfe von optischen Sensoren Hindernisse erkannt werden.

Projektfamilientreffen Köln, 17. – 18.10.2024

Die Bernard Technologies GmbH nahm am Projektfamilientreffen in Köln teil und präsentierte ihren interaktiven Demonstrator. Mithilfe dieses Demonstrators wurde der Use-Case zum ODD-konformen Routing anschaulich erklärt. Der Demonstrator wird auch bei der Abschlussveranstaltung gezeigt werden.

Neben den offiziellen Präsentationen der Projektfamilie spielte der Austausch über die aktuelle Situation, bestehende Herausforderungen und die zukünftige Entwicklung der Gaia-X-Projekte eine zentrale Rolle.

Konsortialtreffen online, 16.12.2024

Die Bernard Technologies GmbH nahm am online Konsortialtreffen im Dezember teil. Im Mittelpunkt des Treffens stad die Planung für die Abschlussveranstaltung. Zusätzlich wurde die Berichte, sowie zukünftige Veröffentlichungen diskutiert.

Abschlussdemonstration, 13. – 14.5.2025

Die Bernard Technologies GmbH nahm an der Abschlussdemonstration teil und präsentierte dabei mehrere Beiträge.Zum einen wurde die Hinderniserkennung anhand eines Modells demonstriert. Darüber hinaus wurde ein mobiler optischer Sensor als Demonstrations- und Anschauungsobjekt aufgebaut und in Betrieb genommen. Zusätzlich hielt das Unternehmen einen Kurzvortrag über die Vorteile von Gaia-X für die Verkehrsplanung.

Anhang B: OpenLABEL JSON für Hindernisse


```
{
  "openlabel": {
    "metadata": {
      "schema_version": "1.0.0"
    },
    "ontologies": {
      "0": {
        "uri":                                "https://openlabel.asam.net/V1-0-
0/ontologies/openlabel_ontology_scenario_tags.ttl",
        "boundary_list": [
          "TrafficFlowRate"
        ],
        "boundary_mode": "include"
      },
      "1": {
        "uri":
"../resources/ontologies/openlabel_ontology_scenario_tags_extension.ttl",
        "boundary_list": [
          "ZoneGeoFenced",
          "TemporaryStructureBlockedRoad"
        ],
        "boundary_mode": "include"
      }
    },
    "tags": {
      "0": {
        "type": "ownerName",
        "ontology_uid": 0,
        "tag_data": {
          "text": [
            {
              "type": "value",
              "val": "Bernard Technologies GmbH"
            }
          ]
        }
      },
      "1": {
        "type": "measurementDate",
        "ontology_uid": 1,
        "tag_data": {
          "text": [
            {
              "type": "value",
              "val": "2023-06-07T10:00:00"
            }
          ]
        }
      },
      "2": {
        "type": "ZoneGeoFenced",
        "ontology_uid": 1,
        "tag_data": {
          "geometry": {
            "type": "LineString",
            "coordinates": [
                [
                  [
                    606119.32546084,
                    5797115.43988395
                  ],
                  [
                    606130.22551471,
                    5797098.94511216
                  ]
                ]
```

```
            ]
          }
        }
      },
      "3": {
        "type": "TrafficFlowRate",
        "ontology_uid": 0,
        "tag_data": {
          "num": [
            {
              "type": "value",
              "val": "1"
            }
          ]
        }
      },
      "4": {
        "type": "TemporaryStructureBlockedRoad",
        "ontology_uid": 1
      }
    }
  }
}
```