Technische Hochschule Ingolstadt

Gaia-X 4 AMS

Ein Projekt der Gaia-X 4 Future Mobility Projektfamilie

Schlussbericht

GAIAX 4 AMS

Technische Hochschule Ingolstadt
19S21004O

Dokumenteigenschaften

Titel	Schlussbericht
Vorhabenbezeichnung	GAIA-X 4 AMS
Laufzeit des Vorhabens	01.12.2021 – 28.04.2025
Berichtszeitraum	01.12.2021 – 28.04.2025
Firma / Institut	THI Institut für Innovative Mobilität
Erstellt von	Zhiran Yan
Beteiligte	Zhiran Yan, Irina Schaab, Marcel Kettelgerdes, Gordon Elger
Geprüft von	Gordon Elger
Freigabe von	Gordon Elger
Datum	28.11.2025
Version	1.0

Inhaltsverzeichnis

1 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse 4

1.1 TP 1 GAIA-X Framework 4
1.2 TP 2 Infrastruktur - Ökosystem 5
1.3 TP 3 Daten- und Dienste-Ökosystem 6
1.4 TP 4 Sichere Koordination von autonomen Fahrzeugen 7
1.5 TP 5 Kooperierende Fahrmanöver (Vernetzter und sicherer Rettungskorridor) 9

2 Haben sich die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Vorhabens innerhalb des angegebenen Berichtszeitraums gegenüber dem ursprünglichen Antrag geändert? 11

3 Sind inzwischen von dritter Seite FE-Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind? 11

4 Sind Änderung in der Zielsetzung notwendig? 11

5 Fortschreibung des Verwertungsplans (jährlich) 11

1 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

- Ausarbeitung von Nutzungskonzepten der Sensordaten für die Use-Cases TP 4 und TP5 inklusive der Sensordaten von hochautomatisierten Drohnen (AP.1.1.3)
- Spezifikation der Datenstruktur der RSU zur Nutzbarmachung in weiteren Datenräumen (AP2.3.1)
- Integration von „nicht optimalen“ (physikalisch basierten) Sensormodellen in einen virtuellen Zwilling (AP4. 2.3)
- Aufbau der vernetzten Fahrzeuge mit Sensorik (Sensorfahrzeug, flexible Sensorbox) die für die Generierung von Datensätzen genutzt wurden (AP4.3.1)
- Messkampanien in den Ingolstädter Testfeldern (SaveNow und In2Lab) werden durchgeführt (AP 5.2.3)
- Der Virtuelle Zwilling für die Anomalie Detektion (Baustellenerkennung) wurde erstellt und für die Datengenerierung erfolgreich eingesetzt (AP4.2.4)
- Der Entwurf der Anomalie Detektion innerhalb des ausgewählten Szenarios ODD-getrieben wurde auf Basis neuer Forschungserkenntnisse aktualisiert (AP4.2.1)
- Die Algorithmen Entwicklung zur Anomalie Erkennung basierend auf den Sensordaten eines Fahrzeuges wurde auf Basis der virtuellen Daten gestartet (AP4.2.6)
- Luftgestützte Datenerfassung über hochautomatisierte Drohnen wurde im TP5 der THI durchgeführt und Szenarien für boden- und luftgestützte Datenerhebung wurden definiert (AP 5.3.1)

1.1 TP 1 GAIA-X Framework

AP 1.1.1 Konzeptentwicklung Datenschutzkonforme Nutzung von infrastrukturell erhobenen Daten innerhalb des Gaia-X Ökosystems

Die THI entwickelte im Rahmen von GAIA-X 4 AMS ein datenschutzkonformes Nutzungskonzept für multisensorische Straßenraumdaten (RGB, LiDAR, Radar, GPS/IMU).

Ergebnisse der THI:

- Entwicklung einer **automatisierten DSGVO-Anonymisierungspipeline** für alle Kameradaten (basierend auf YOLOv8).
- vollständige Schwärzung/Maskierung von Gesichtern, Kfz-Kennzeichen.
- Sicherstellung der GAIA-X-Konformität: *Policy Rules, Data Sovereignty, Re-traceability*.
- Definition von **GAIA-X-fähigen Datenprodukten** (RGB anonymisiert, LiDAR-Punktwolken, segmentierte Baustellenbereiche, 3D-Out-of-Distribution-Masken).

Damit schafft die THI die Grundlage für eine rechtskonforme Nutzung von Multisensor-Daten in zukünftigen Mobilitätsdatenräumen.

AP 1.1.2 Anforderungsanalyse und Spezifikation für die Datenfusion

THI führte eine detaillierte Analyse der Anforderungen an die Datenfusion für die in TP4 und TP5 vorgesehenen Use-Cases durch. Der Schwerpunkt lag auf der Ableitung funktionaler, technischer und datenschutzrechtlicher Anforderungen für die Fusion von Fahrzeug-, Infrastruktur- und Luftdaten (Drohnen).

AP.1.1.3 Ausarbeitung von Nutzungskonzepten der Sensordaten für die Use-Cases (TP 4 und 5)

THI entwickelte Nutzungskonzepte für alle relevanten Sensordatenquellen im Projektkontext. Die Nutzungskonzepte beschreiben, wie die Sensordaten in den beiden Hauptsträngen TP4 (Sichere Koordination autonomer Fahrzeuge) und TP5 (Kooperierende Fahrmanöver / Rettungskorridor) operativ eingesetzt und in GAIA-X Dienste überführt werden.

1.2 TP 2 Infrastruktur - Ökosystem

AP 2.1.1 Detaillierte Spezifikation der Hardware (Sensoren, Prozessoren) für Gaia-X-kompatible RSUs

Die THI unterstützte durch Erfahrungen aus dem Sensorfahrzeugbau (Multi-LiDAR/Kamera/Radar) die Spezifikation von RSU-Hardwareanforderungen für urbane Szenarien.

Ergebnisse der THI:

- Ableitung der notwendigen Sensorik für RSUs aus Real- und Simulationsdaten: Kamera, LiDAR, Radar, Kommunikationsmodule.
- Anforderungen an Rechenhardware (GPU-fähige Edge-Computer zur Echtzeit-OOD-Erkennung).
- Übertragung der Sensorkonfigurationen des THI-Sensorfahrzeugs als Referenzmodell für RSUs

AP 2.1.2 Datenfusionsarchitektur innerhalb der RSU

Die THI entwickelte und validierte Verfahren der multimodalen Fusion (RGB–LiDAR–Radar), die auch für RSU-Daten anwendbar sind.

Ergebnisse:

- Erforschung von Fusionstechniken (PointPainting, Early/Mid/Late Fusion).
- Definition robuster Repräsentationen für Infrastrukturperspektiven.
- Übertragbarkeit der THI-Fusionsergebnisse auf stationäre Sensoren nachgewiesen.

AP 2.1.3 Anpassung der 5G-fähigen V2X-Kommunikation in den RSUs

Die THI definierte die Anforderungen für 5G-basierte Datenübertragung (Datenrate, Latenz, Synchronisation).

AP 2.1.4 Architektur zum Speichern von Daten zur Verwendung in verschiedenen Anwendungsfällen

Spezifikation von Speicherformaten (KITTI-kompatibel), und semantischen Datenstrukturen (JSON).

AP 2.1.5 Algorithmen Entwicklung für datenschutzkonforme Datenbereitstellung

- automatische Anonymisierung
- On-Edge-Datenverarbeitung → keine Raw-Daten in die Cloud
  strukturierte Weitergabe von abstrahierten 3D-Objekten statt Raw-Bildern

AP 2.1.6 Algorithmen Entwicklung zur Datenreduktion und Zwischenspeicherung für die Datenbereitstellung im Gaia-X Ökosystem in den RSUs

- Reduktion großer LiDAR-Datenmengen mittels voxelbasierter Filterung
- Generierung von Objektlisten statt Punktwolken/Bilder

AP 2.2.1 Konzeption von Mission Control für automatisierte infrastrukturgestützte Fahrfunktionen mit Fokus auf „Command and Control“.

Wenn das Fahrzeug aufgrund einer Behinderung die Sichtlinie verliert, sendet das RSU-Wahrnehmungssystem ein Signal an das Fahrzeug, dass die Strecke befahrbar ist.

AP2.2.2 Algorithmen zur datenschutzkonformen Sensordatenfusion und Verarbeitung von Sensordaten auf der Missionskontrolle

- Nutzung abstrahierter Sensordaten (Segmentmasken, 3D-Objektlisten)
- Unterstützung von Infrastruktur-basierten Risikoanalysen

AP2.3.1 Spezifikation der Datenstruktur der RSU zur Nutzbarmachung in weiteren Datenräumen

Die 3D-Begrenzungsbox eines Objekts beschreibt die Position, Ausrichtung und Kategorie des betreffenden Objekts und ist universell einsetzbar.

AP2.3.2 Entwicklung, Test und Validierung zur datenschutzkonformen Nutzung der Sensordaten aus der Infrastruktur

- Validierung der Anonymisierung an realen Szenarien
- Sicherstellung der Nutzbarkeit der Daten für KI-Algorithmen nach der Anonymisierung

AP2.3.3 Ausarbeitung eines Domänenübergreifenden Datenschutzkonzeptes für Sensordatennutzung in der Infrastruktur

Die THI lieferte Beiträge zur Harmonisierung von Datenschutzanforderungen zwischen Infrastruktur (RSU), Fahrzeug und Drohnen.

1.3 TP 3 Daten- und Dienste-Ökosystem

AP3.1 Anforderung an Informationen und Daten, um auf Basis von TP3 die Use Cases in TP4 und TP5 zu realisieren

Die THI definierte folgende Datenanforderungen:

- hochauflösende LiDAR-Daten
- synchronisierte RGB-Bilder
- Radar-Punktwolken
- GPS/IMU-Daten
- Wetter- und Kontextdaten
- Anomaliescores (2D und 3D)
- Digital-Twin-Metadaten

AP3.2 Erarbeitung von Authentifizierungskonzepten in die Road Side Units

- Evaluierung von Sicherheitsanforderungen
- Schutz personenbezogener Daten
- Minimierung der übermittelten Rohdaten (Privacy-by-Design)

AP3.3.1 Konzept für einen Digitalen Zwilling, welcher in TP 4 und TP 5 für kooperative Manöver verwendet werden

- Definition eines modularen Digital Twin für Straßenumgebungen
- Anforderungen: variiertes Wetter, Beleuchtung, Baustellenelemente

AP3.3.2 Entwicklung des generischen Digitalen Zwillings zum Einsatz in TP 4 und TP 5

Die THI entwickelte einen vollständigen Digital Twin in CARLA:

- 8 simulierte Städte
- 89 Baustellenszenarien
- realistische Sensormodelle
- automatische Annotationen
- LiDAR-, Radar-, Kamera-, GPS/IMU-Simulation

AP3.3.3 Verifizierung der Funktion des Digitalen Zwillings

- .Cross-Domain-Performance Tests
- Vergleich Realwelt vs. Virtual Twin
- Validierung der Sensorrealismen

AP3.4 Test der Fälschbarkeit von Daten aus den Road Side Units in der Infrastruktur

Robustheitsanalyse der Anomalie-Algorithmen gegen manipulierte OOD-Objekte (Fake Objects, adversarial Examples).

1.4 TP 4 Sichere Koordination von autonomen Fahrzeugen

AP 4.1 Spezifikation der Road Side Units, Festlegung der Szenarien

THI leitete Szenarien aus Realfahrten, Testfelddaten und Digital Twins ab:

- statische & mobile Baustellen
- verlorene Gegenstände
- blockierte Fahrspuren
- komplizierte Verkehrsführungen
- Nacht & Regen

AP4.2.1 Entwurf der Anomalie Detektion innerhalb des ausgewählten Szenarios ODD-getrieben

- Baustellen Detektion
- Anforderungen an die Detektion unbekannter Objekte auf den Straßen

AP4.2.2 Realisierung eines virtuellen Zwillings für das ausgewählte Szenario (3D Modelle Straßenzüge, Fahrzeuge)

Realisierung in CARLA Simulator

AP4. 2.3 Integration von „nicht optimalen“ (physikalisch basierten) Sensormodellen in den virtuellen Zwilling

- LiDAR-Rauschen, Drop-Outs
- Kameraverzerrung

AP4.2.4 Datengenerierung mit Hilfe des virtuellen Zwillings

- über 8.000 synthetische Daten
- enthält Baustellen, Anomalien, Verkehrsstörungen

AP4.2.5 Kopplung von KI-Algorithmen an die virtuelle Datengenerierung

- automatisiertes Training mit synthetischen Daten
- Domain Randomization
- sensor modality mixing
- automatisiertes Labeling

AP4.2.6 Algorithmen Entwicklung zur Anomalie Erkennung basierend auf den Sensordaten eines Fahrzeuges

Implementierte THI-Pipelines:

Pipeline A – Roadwork Detection:

- 2D SegFormer
- PointPainting
- 3D Konsistenzcheck
- globale Geo-Lokalisierung

Ergebnis → IEEE IV 2025 Paper akzeptiert

Pipeline B – Kamera-basiert OOD-Segmentierung (2D)

- Mask2Former + CLIP Validierung
- Entdeckung kleiner unbekannte Objekte

Ergebnis → Paper „Road-Aware Anomaly Segmentation with Query-Guided Polygons and CLIP for Autonomous Driving“ wurde eingereicht und wird derzeit geprüft.

Pipeline C – LiDAR-basiert OOD-Segmentierung (3D)

- Mask4Former + Unsicherheitsbewertung
- Entdeckung kleiner Objekte

Ergebnis → Paper „AR3DAS: Training-Free Acceptance-Rejection for 3D Anomaly Segmentation with Mask Transformer and LiDAR-Camera Late Fusion“ wurde eingereicht und wird derzeit geprüft.

AP4.2.7 Erweiterung der Anomalie Detektion mittels Sensordatenfusion (Fahrzeuge, Infrastruktur, Wetterinformation, Positionsdaten,3D Umgebungsdaten)

Kamera- LiDAR-fusion- basiert OOD-Segmentierung (3D)

- Mask4Former + Unsicherheitsbewertung+ CLIP Validierung
- Entdeckung kleiner Objekte

AP4.3.1 Ausstattung von Vernetzten Fahrzeugen mit Sensorik und Kommunikationseinheiten.

vollständiges THI-Multisensor-Fahrzeug (Kamera + LiDAR + Radar + GPS/IMU +5G Modul)

AP4.3.2 Datenerhebung im öffentlichen Raum und im Testfeld Ingolstadt

- Realfahrten in Ingolstadt
- Testfeldkampagnen
- Sensor Rohdaten
- vollständige DSGVO-Anonymisierung

4.3.3 Test und Validierung der Algorithmen über virtuelle und experimentelle Demonstration

- Objekterkennungs- (Baustellen) und Segmentierungsalgorithmen (Out-of-distribution) auf Basis von Kameras und Lidar wurden sowohl mit realen als auch mit synthetischen Daten trainiert und getestet. Darüber hinaus wurden die trainierten KI-Algorithmen eingesetzt.

1.5 TP 5 Kooperierende Fahrmanöver (Vernetzter und sicherer Rettungskorridor)

Die Arbeitspakete innerhalb des TP5 wurden zuvor neu strukturiert, da für die experimentelle Untersuchung der Rettungsgassenbildung kein automatisiertes Fahrzeug zur Verfügung steht und in diesem Bereich keine Mitarbeiter*innen gefunden werden konnten. Die Beteiligung der THI im TP5 wurde daher neu auf die drohnengestütze Verkehrsüberwachung ausgerichtet. In Abspreche mit den Projektpartnern wird im Projekt eine Cloud-Anwendung zur Echtzeit 3D-Segmentierung des Überfluggebietes demonstriert.

AP5.1 Anforderungsmanagement und Architekturentwicklung

War abgeschlossen, wurde aber nach der Überarbeitung der Arbeitspakete in AP5 überarbeitet. Die Anforderungen für das automatisierte Fliegen konnten größtenteils aus dem Forschungsprojekt R3D3 der THI entnommen werden.

AP5.1.2 Anforderungsanalyse und Spezifikation Road Side Units für den Use Case (Sensoren und Kommunikation)

Abgeschlossen vor dem Berichtzeitraum.

AP 5.2.1 Aufbau/Erweiterung von zusätzlicher Road Side Units für Testfeld und Testgelände

Die wesentliche Erweiterung der Sensorboxen wurde abgeschlossen vor Beginn des Berichtzeitraumes. Softwareanpassungen und kontinuierliche Verbesserungen der Messsoftware werden bei Bedarf noch durchgeführt.

AP 5.2.2 Erweiterung der Sensorausstattung von Bestandsfahrzeugen und Beschaffung eines weiteren Sensorfahrzeuge (Neu AP4.2.1.2)

Dieses Arbeitspaket wurde in das AP4 verschoben und als Unterarbeitspaket in das AP4.3.1 integriert. In dem AP4.3.1 wird einerseits ein neues Sensorfahrzeug angeschafft und mit Sensorik ausgestattet (AP4.3.1.1).

AP 5.2.3 Messkampanien auf dem Testfeld und innerhalb der Ingolstädter Testfelder

Messkampanien, um die Performance der Sensorsysteme zu evaluieren, laufen gegenwärtig im Testfeld In²Lab und mit mobilen Road Side Units. Diese Messkampanien liefern die Datenbasis für die Algorithmen Entwicklung und das Datenmanagement von in der Infrastruktur erhobenen Daten. Die Kalibrierung der RSUs wurde abgeschlossen. Hierzu wurde ein Paper publiziert:

Static multi-target-based auto-calibration of RGB cameras, 3D Radar, and 3D Lidar sensors, Shiva Agrawal, Savankumar Bhanderi, Kristina Doycheva, Gordon Elger, IEEE Sensors Journal 2023 (Early Access), DOI: 10.1109/JSEN.2023.3300957

AP 5.3.1 Auswahl geeigneter Szenarien für boden- und luftgestützte Datenerhebung

Die anfangs für die Fahrzeug und Infrastruktur Sensorik definierten Szenarien, welche auf den Testfeldern des Konsortiums durchgeführt werden, wurden mit Szenarien für die luftgestützte Datenaufzeichnung ergänzt: 1) Analyse der Verkehrssituation im Notfall, d.h. um z.B. nach einem Unfall die Situation zu erfassen wird eine automatische Drohne zur Datenerfassung verwendet (Pathfinder Rettungsfahrzeug) 2) Kontinuierliche Erfassung von Verkehrsdaten für die Verkehrssteuerung. 3) Szenarien Erfassung für die Algorithmen Entwicklung. 4) Automatische luftgestützte Geschwindigkeit und Abstandsmessung

AP5.3.2 Digitaler Zwilling zur Erzeugung Synthetischer Daten zur Algorithmen Entwicklung zur Straßenverfolgung

In Abstimmung mit den Projektpartnern beschränken sich die Arbeiten der THI im Rahmen von AP5 auf die hochgenaue Umfeldsegmentierung während dem Drohnenflug.

AP5.3.3 Digitaler Zwilling zur Erzeugung Synthetischer Daten zur Algorithmen Entwicklung zur Erkennung von Verkehrssituationen Stau/Rettungsgasse

In Abstimmung mit den Projektpartnern beschränken sich die Arbeiten der THI im Rahmen von AP5 auf die hochgenaue Umfeldsegmentierung während dem Drohnenflug.

AP5.3.4 Algorithmen Entwicklung zur Straßen Verfolgung für Erkundungsdrohnen (Drohne folgt im sicheren Abstand dem Straßenverkauf)

In Abstimmung mit den Projektpartnern beschränken sich die Arbeiten der THI im Rahmen von AP5 auf die hochgenaue Umfeldsegmentierung während dem Drohnenflug.

AP5.3.5 Testflüge: Messkampanien zur Aufnahme von Daten zum Algorithmentraining

In Abstimmung mit den Projektpartnern beschränken sich die Arbeiten der THI im Rahmen von AP5 auf die hochgenaue Umfeldsegmentierung während dem Drohnenflug.

AP5.3.6 Algorithmen Training auf Daten Straßen Verfolgung

In Abstimmung mit den Projektpartnern beschränken sich die Arbeiten der THI im Rahmen von AP5 auf die hochgenaue Umfeldsegmentierung während dem Drohnenflug.

AP5.3.7 Algorithmen Training auf Daten Verkehrssituationserkennung

In Abstimmung mit den Projektpartnern beschränken sich die Arbeiten der THI im Rahmen von AP5 auf die hochgenaue Umfeldsegmentierung während dem Drohnenflug.

AP5.4.1 Experimentelle Validierung Straßen Verfolgung

In Abstimmung mit den Projektpartnern beschränken sich die Arbeiten der THI im Rahmen von AP5 auf die hochgenaue Umfeldsegmentierung während dem Drohnenflug.

AP5.4.2 Experimentelle Validierung Erkennung von Verkehrssituationen Stau/Rettungsgasse

In Abstimmung mit den Projektpartnern beschränken sich die Arbeiten der THI im Rahmen von AP5 auf die hochgenaue Umfeldsegmentierung während dem Drohnenflug.

AP5.5.1 Einbindung der Anwendung in WP5 Use-Case / Demonstration

Abgeschlossen. Eine Demo zur Cloud-basierten 3D-Umweltsegmentierung während des Drohnenflugs wird auf der Abschlussveranstaltung gemeinsam mit den Projektpartnern vorgestellt.

AP6.2.1 Austausch mit den Projektkoordinatoren der Projektfamilie, insbesondere mit Gaia-X 4KI

Abgeschlossen. Im Berichtszeitraum wurde seitens THI eine Live-Demo des Messfahrzeugs, sowie eine Video-Demo des Use-Cases aus AP4 vorbereitet, welche am 14.05.2025 beim Abschlussevent vorgestellt werden.

AP6.3.1 Kooperation innerhalb der Ingolstädter Testfelder und Testgelände

Ein fortlaufendes Arbeitspaket, da die Aufzeichnung in den Testfeldern essentiell ist, um bspw. Referenzdaten aus der Infrastruktur zu beziehen.

AP6.3.2 Erstellen von Präsentationen und Reports für die Konsortialmeetings, Scheiben von wissenschaftlichen Publikationen

Im Berichtszeitraum wurde seitens THI eine Live-Demo des Messfahrzeugs, sowie eine Video-Demo des Use-Cases aus AP4 vorbereitet.

Des Weiteren wurden während der Projektlaufzeit drei Publikation wurden veröffentlicht:

Publication Title: 2025 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) Article Title: Framework and Multi-Modal Dataset for Roadwork Zone Detection and Geo-Localization

Author(s): Zhiran Yan, Yutong Xin, S Shyam Shenoi, Rui Song, Gordon Elger, Paper Id: its.IV25.81.8a31a6ce

Multi-Sensor Data Fusion for Real-Time Multi-Object Tracking, N. Senel, K. Kefferpütz, G. Elger, MDPI Processes, 2023 11(2):501, Special Issue “Smart Sensor Systems and Data Fusion” , DOI: 10.3390/pr11020501

Static multi-target-based auto-calibration of RGB cameras, 3D Radar, and 3D Lidar sensors, Shiva Agrawal, Savankumar Bhanderi, Kristina Doycheva, Gordon Elger, IEEE Sensors Journal 2023 (Early Access), DOI: 10.1109/JSEN.2023.3300957