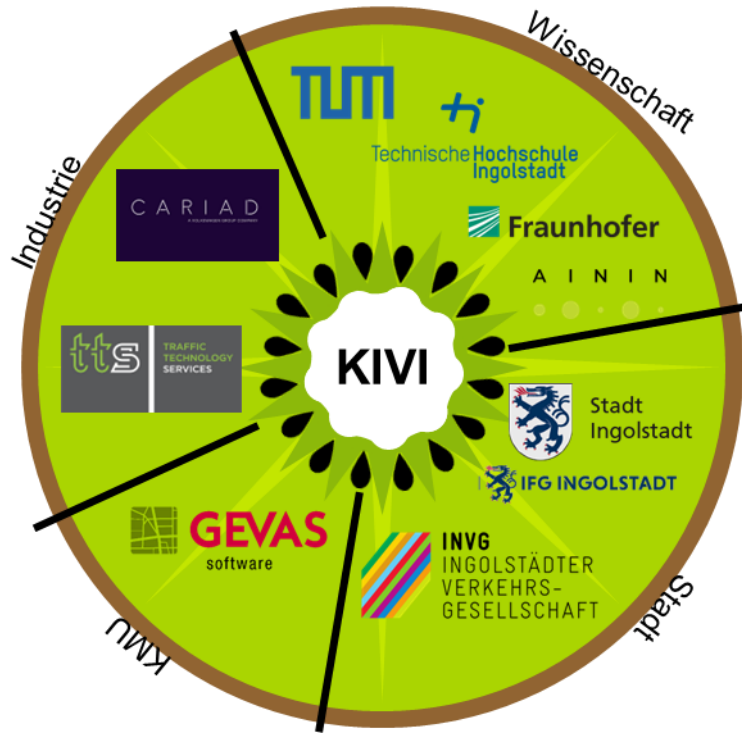


Gesamtschlussbericht Projektkonsortium



Künstliche Intelligenz im Verkehrssystem Ingolstadts (KIVI)

Förderkennzeichen: 45KI05C031

Berichtszeitraum: 10.2020 – 06.2024

I. Projektübersicht

a) Projektbeschreibung und Zielsetzung

Im Rahmen des Projektes sollen datengetriebene Verfahren der Künstlichen Intelligenz (KI) entwickelt werden, um die Verkehrssteuerung und Verkehrssicherheit in Ingolstadt zu verbessern. Hierzu erfolgt der Aufbau eines High Definition Testfeldes (HDT), welches drei hochbelastete Knotenpunkte umfasst (AP 1). In diesem HDT wird lokale Sensorik eingesetzt, welche auf Basis von KI-Verfahren alle Verkehrsteilnehmer erkennt. Die Rohdaten mehrerer Thermalkameras und LiDAR-Sensoren an den Kreuzungen des HDT werden dabei in Echtzeit einzeln verarbeitet (AP 1.5), um die Daten später zu fusionieren (AP 3.3). Ergänzt wird dies durch mobile Sensorik auf der Basis von FXD (Floating X Data) durch Pkws, Bussen, Fahrrädern und mit 5G-Smartphones ausgestatteten Fußgängern (AP 2). Beide Datenquellen werden auf einer aufgebauten bzw. erweiterten Datenplattform für den operativen Betrieb sowie einer abgeschotteten Spiegelung für Forschungszwecke durch KI-basierte Fusionsverfahren kombiniert (AP 3.1). Eine datenschutzrechtlich einwandfreie Verwendung und Anonymisierung jeglicher Daten wird durch datenjuristische Experten sichergestellt (AP 0.3). Um ein möglichst vollumfängliches aktuelles digitales Abbild der lokalen und netzweiten Verkehrslage zu generieren sowie eine Prognose des multimodalen netzweiten zukünftigen Verkehrssituation vornehmen zu können erfolgt die KI-basierte Fusion sämtlicher mobiler und stationärer Sensordaten (AP 3.1-3.4).

Auf Basis dieser Datengrundlage wird in einem ersten Schritt die gesamte Prozesskette von der Planung (AP 4.1) über die Steuerung (AP 4.2) bis zum „Erleben“ (AP 4.3) des Knotenpunktes optimiert. Die optimale und nachfragebasierte Steuerung der Lichtsignalgesteuerten Knoten in Ingolstadt ermöglicht so die bedarfsgerechte Freigabezeitverteilung für alle Verkehrsteilnehmer (Untersuchung der Eignung von Fußgänger-Daten für eine lokale Verkehrssteuerung) mit dem Ziel keine „wertvollen“ Grünzeitannteile zu verschwenden. Busse erhalten hierfür Geschwindigkeitsempfehlung zum optimalen Anfahren und Queren eines Lichtsignalisierten Knotenpunktes (AP 2.4) und die verbesserte Prognosefähigkeit der Schaltzeitpunkte der LSA garantiert einen besser erlebbaren Ampelassistenten in Fahrzeugen (AP 4.3). In einem zweiten Schritt wird die vollumfängliche Informationslage über die Verkehrsteilnehmer an den Knotenpunkten ebenfalls für eine Optimierung der Verkehrssicherheit eingesetzt. Dafür wird eine Warnfunktion konzipiert und umgesetzt (AP 5) welche durch KI-Verfahren das Verhalten und die Intention von (nicht-)motorisierten Verkehrsteilnehmern erkennt und so gezielt vor Gefahrensituationen visuell und akustisch warnen (wie beispielsweise Kinder vor herannahenden Sondereinsatzfahrzeugen oder rechtsabbiegenden Lkw). Durch eine Potentialanalyse (AP 6.2) sowie eine Validierung (AP 6.3) der im Projekt entwickelten Verfahren und Ergebnisse können die Verbesserungspotentiale evaluiert und eingeordnet werden (AP 6.1). Durch eine frühe Einbindung weiterer Kommunen über mehrere externe Workshops (AP 0.4) wird garantiert, dass keine Insellösungen entwickelt werden, sondern die Verfahren übertragbar sind und als Blaupause (AP 6.4) auch für andere Städte dienen können.

Im Rahmen der zunehmenden Digitalisierung und Vernetzung des Verkehrssystems werden in diesem Projekt die Potentiale der KI zur multimodalen Verkehrssteuerung im urbanen Verkehr aufgezeigt und demonstriert. Dazu werden mittels KI-Verfahren neue Steuerungen entwickelt, angewendet und im bestehenden Verkehrssystem der Stadt Ingolstadt im Realbetrieb netzweit und lokal getestet. Die Steuerungen sollen durch die Verwendung unterschiedlichster und teils neuartiger Datenquellen, wie z. B. von Fahrzeugflotten, ÖPNV-Fahrzeugen, Fahrradfahrern und lokal erfasster Sensordaten von Fußgängern und sonstigen Verkehrsteilnehmern in situ und mit minimaler Latenz oder auch netzbezogen strategisch auf die aktuelle Verkehrslage reagieren. Damit sollen zum einen die Verkehrssicherheit erhöht werden und zum anderen der Verkehrsfluss und die Leistungsfähigkeit der Infrastruktur durch eine gegenseitige Beeinflussung von Fahrzeugen und Signalanlagen optimiert werden. Dies trägt zur Reduzierung der verkehrsbedingten Emissionen bei. Das Projekt unterteilt sich damit in eine globale

Betrachtung des Verkehrsablaufs im Netz und eine lokale Betrachtung eines ausgewählten und begrenzten High Definition Testfeldes (HDT), das zusätzlich mit stationärer Sensorik ausgestattet wird, um alle Verkehrsteilnehmer hochgenau an multimodalen Knotenpunkten zu erfassen. Je nach Anwendungsfall werden die KI-Verfahren online (zur laufenden Analyse und Optimierung) oder offline (zur Analyse wiederkehrender Situationen in den über einen längeren Zeitraum gesammelten Daten oder zur Evaluation der Wirksamkeit von Veränderungen in der Verkehrssteuerung) implementiert.

b) Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Einschränkungen durch die Covid-Pandemie bei der Datenerhebung, sowie generell der Durchführung der Feldversuche durch Covid-bedingte, vom Standard abweichende, Verkehrssituationen und Verkehrszusammensetzungen führten zu Projektverzögerungen. Zudem gab es Einschränkungen durch die Covid-Pandemie bei der Zusammenarbeit und regulären Treffen und Austausch im Konsortium. Inhaltlich konnten sämtliche Aspekte aus dem Projektantrag aufgearbeitet und Rückstände aufgeholt werden.

c) Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Großteil der Planung fand bereits in der Antragsphase statt, auf welchem detaillierten Arbeits- und Zeitplan aufgebaut werden konnte. Es fand dann während der Projektlaufzeit eine laufende Anpassung an Herausforderungen und Verzögerungen statt. Diese Vorgehensweise hat sich als geeignet herausgestellt. Für die Umsetzung des HDT wurde auf der CARISSMA Freiversuchsfläche eine prototypische Umsetzung aufgebaut, um geeignete Komponenten wie Sensoren, Rechner, Switches, etc. frühzeitig zu bestimmen und Algorithmen zur Kalibrierung, Zeitsynchronisation, etc. zu entwickeln.

d) Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere

a. internationale und nationale Arbeiten zum Thema des Vorhabens

Durch einen kontinuierlichen Fortschritt in der Sensor- und Kommunikationstechnologie finden sich in der aktuellen ITS-Infrastruktur eine Vielzahl von infrastrukturbasierten und fahrzeuginternen Sensoren. Für eine effiziente Interpretation der Sensordaten ist die Anwendung geeigneter Datenfusionstechniken unerlässlich, wozu auch bereits in der Wissenschaft zahlreiche Ansätze entwickelt wurden wie beispielsweise:

- El Faouzi, N.-E.; Klein, L.A. (2016): Data Fusion for ITS: Techniques and Research Needs.
- Shahrababaki, M.R.; Safavi, A.A., Papageorgiou, M.; Papamichail, I. (2018): A Data Fusion Approach for Real-Time Traffic State Estimation in Urban Signalized Links.
- Papapanagiotou, E.; Busch, F. (2019): Extended Observer for Urban Traffic Control Based on Limited Measurements from Connected Vehicles.
- Zhao, S.; Zhan, K. (2016): Observing Space-Time Queueing Dynamics at a Signalized Intersection using Connected Vehicles as Mobile Sensors.

Die Datenfusion an sich ist nicht das Endresultat der Datensammlung und -analyse. Das Ziel ist vielmehr, dem Steuerungssystem (Mensch oder Maschine) die notwendigen Informationen zu liefern, um eine bessere Entscheidung zu treffen. Die prädiktive Analytik ist ein aufstrebendes Forschungsgebiet, das sich mit der zukunftsnahe Zustandsvorhersage für proaktive Kontrollmaßnahmen befasst und in welchem bereits einigen wissenschaftliche Vorarbeiten stattgefunden haben:

- Antoniou, C.; Koutsopoulos, H.N.; Yannis, G. (2013): Dynamic Data-Driven Local Traffic State Estimation and Prediction.

- Zhang, Y.; Haghani, A. (2015): A Gradient Boosting Method to Improve Travel Time Prediction.
- Fusco, G.; Colombaroni, C.; Isaenko, N. (2016): Short-Term Speed Predictions Exploiting Big Data on Large Urban Road Networks.
- Elfar, A.; Talebpour, A.; Mahmassani, H.S. (2018): Machine Learning Approach to Short-Term Traffic Congestion Prediction in a Connected Environment.

Die Aufzeichnung vollständiger Trajektorien von Verkehrsteilnehmern ist ein wertvoller "vollständiger" Datensatz, der die Ground Truth für die Bewertung der Datenfusionstechniken bei unvollständiger Erkennung liefert. Der NGSIM-Datensatz war in dieser Hinsicht ein sehr erfolgreiches Beispiel, und die nächste Generation von Experimenten dieser Art verwendet luftgestützte Beobachtungen, um ein noch größeres Gebiet kontinuierlich zu erfassen:

- Barmounakis, E.; Geroliminis, N. (2020): On the new Era of Urban Traffic Monitoring with Massive Drone Data: The pNEUMA Large-Scale Field Experiment.
- Tomar, E.S.; Verma, S. (2011): Neural Network Based Lane Change Trajectory Prediction in Autonomous Vehicles.
- Twaddle, H.; Busch, F. (2019): Binomial and Multinomial Regression Models for Predicting the Tactical Choices of Bicyclists at Signalised Intersections.

Die Optimierung des Verkehrsflusses unter Nutzung der neuen Möglichkeiten durch Big Data und Machine Learning ist ein weiteres Forschungsgebiet. Datenplattformen, Systemarchitekturen und neuartige Lösungen zur Verkehrssteuerung und dem Verkehrsmanagement sind nur einige Beispiele hierbei:

- Rodrigues, F.; Lima Azevedo, C. (2019): Towards Robust Deep Reinforcement Learning for Traffic Signal Control: Demand Surges, Incidents and Sensor Failures.
- Jin, J.; Ma, X. (2017): Hierarchical Multi-Agent Control of Traffic Lights Based on Collective Learning.
- J. Li, J. Li, and H. Zhang, "Deep learning based parking prediction on cloud platform," in 2018 4th International Conference on Big Data Computing and Communications (BIGCOM), 2018, pp. 132–137.
- F. Yu, J. Guo, X. Zhu, and G. Shi, "Real time prediction of unoccupied parking space using time series model," in 2015 International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), 2015, pp. 370–374.

Für die Grundlagen der lokalen und netzweiten Verkehrssteuerung und Bewertung dieser sind unter anderem diese von Relevanz:

- M. Papageorgiou, C. Kiakaki, V. Dinopoulou, A. Kotsialos, and Y. Wang, "Review of road traffic control strategies," *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, no. 12, pp. 2043–2067, 2003.
- F. Busch and G. Kruse, "MOTION for SITRAFFIC – a modern approach to urban traffic control," in *ITSC 2001. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems*, 2001, pp. 61–64.
- D. I. Robertson, "TRANSYT: A traffic network study tool," *Road Research Laboratory, Ministry of Transport*, vol. 253, no. Road Research Laboratory Report LR 253, 1969.
- S. C. Wong, "Derivatives of the performance index for the traffic model from TRANSYT," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 29, no. 5, pp. 303–327, 1995.
- W. Brilon and T. Wietholt, "Experiences with adaptive signal control in Germany," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2356, no. 1, pp. 9–16, 2013.

Die Steuerung von vernetzten und vollautomatisierten Fahrzeugen wird beispielsweise in diesen Arbeiten adressiert:

- Dresner, K. and P. Stone, Multiagent Traffic Management: A Reservation-Based Intersection Control Mechanism. Proceedings of the Third International 2004, Vol. 3, 2004, pp. 530–537.
- Ding, J., H. Xu, J. Hu, and Y. Zhang, Centralized cooperative intersection control under automated vehicle environment. In 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), IEEE, 2017, pp. 972–977.

b. Bisherige eigene Arbeiten, Expertise des Konsortiums

Unter Beteiligung einer oder mehrere Konsortialpartner wurden bereits zahlreiche Forschungsprojekte erfolgreich abgeschlossen auf deren Ergebnissen im Rahmen dieses Vorhabens weiter aufgebaut werden kann. Dies sind unter anderem:

- TRAVOLUTION: Verbesserung des Verkehrsablaufs an LSA in Ingolstadt durch Online-Optimierung der netzweiten Lichtsignalsteuerung mit Evolutionären Algorithmen und LSA-Fahrzeug-Kommunikation zur individuellen Information des Fahrers (beteiligt: Ingolstadt, INVG, TUM, GEVAS, CSO)
- Grüne Welle Emissionsuntersuchungen: Untersuchung der verkehrlichen und emissionstechnischen Wirkung von modellbasierten Netzsteuerungsverfahren (Grüne Welle) in Ingolstadt durch Datenfusion (beteiligt: TUM)
- UR:BAN: Sichere, wirtschaftliche, energieeffizientere Verkehrsmanagementsysteme für Städte. Datenerhebung, -analyse und Modellierung der Bewegung sowie der Interaktionen zwischen Autofahrern, Fahrradfahrern und schwächeren Verkehrsteilnehmern. Zentrale Optimierung der LSA-Schaltung im Rahmen von Grünen Wellen (beteiligt: TUM, GEVAS, CSO)
- VinstaR: Kostengünstige Verkehrslageerkennung in Städten und Anwendungsprojekte zur Verbesserung der Verkehrsverhältnisse in Ingolstadt. Nutzung der Verkehrslage zur situationsabhängigen Busbeschleunigung (beteiligt: Ingolstadt, INVG, TUM, GEVAS)
- RadOnTime: Reduktion der Rotlichtverstöße und Wartezeiten von Fahrradfahrern durch Restzeitanzeigen an LSA (beteiligt: TUM)
- CENTAURO: Verbesserte Verkehrszustandsschätzung durch Verwendung von V2X und Integration in ein bestehendes Verkehrssteuerungssystem (beteiligt: TUM)
- SIRENE: Beschleunigung von Sicherheits- und Rettungseinsätzen durch Grüne Wellen und optimiertes Routing (beteiligt: GEVAS)
- KoMoD: Kooperative Mobilität im digitalen Testfeld Düsseldorf: Vernetztes Fahren des ÖV und Erprobung des Grüne-Welle-Assistenten trafficpilot im realen urbanen Umfeld (beteiligt: GEVAS, TTS)
- SIRENE: LSA-Priorisierung von Einsatzfahrzeugen (beteiligt: GEVAS)
- BiDiMoVe: Bidirektionale multimodale Vernetzung zur Einsatzoptimierung und gesicherten Priorisierung bestimmter Verkehrsteilnehmer (ÖV, Einsatzfahrzeuge) (beteiligt: GEVAS)
- SAVe: Funktions- und Verkehrs-Sicherheit im Automatisierten und Vernetzten Fahren (beteiligt: Ingolstadt, THI, CSO) (aufgrund von Projektverlängerung noch laufend)
- VERONIKA: Vernetztes Fahren des öffentlichen Nahverkehrs in Kassel: Vernetzung von ÖV-Fahrzeugen und LSA zur Umsetzung einer netzweit energiesparenderen Fahrweise sowie einer emissionsreduzierten LSA-Steuerung. Vernetztes Warnen auf Grundlage einer V2V-Kommunikation zwischen ÖV-Fahrzeugen und Einsatzfahrzeugen (beteiligt: TTS)
- ConVeX: Connected Vehicle (V2X) of Tomorrow (beteiligt: CSO)
- Traffic Pilot (GEVAS)
- SAFIR: Mixed-Reality Ansatz für die Analyse von Verkehrsszenarien zur Erhöhung der Fahrzeugsicherheit; Umsetzung relevanter Szenarien auf Testgeländen (beteiligt: THI)

- KI-Lidar: Miniaturisierte LIDAR-Sensoren mit KI-Zustandsüberwachung für das autonome Fahren (beteiligt: THI)
- HySLEUS: Kombination von maschinellen Lernverfahren (3D-CNN) und physikalischen Modellen zur Trajektorienplanung in kritischen Verkehrsszenarien (beteiligt: THI)
- OLAF: Online maschinelles Lernen mit der Aufgabe KI-Algorithmen durch Beobachtung von erfolgreichen Deeskalationsmanövern von menschlichen Fahrern in kritischen Verkehrsszenarien zu verbessern (beteiligt: THI)
- Validation by Design: Nutzung der „Layerwise-Relevance Propagation“ Methode in tiefen neuronalen Netzwerken und Kombination mit interpretierbaren Algorithmen, um in komplexen Klassifikationsaufgaben Interpretierbarkeit zu ermöglichen (beteiligt: THI, CSO)
- MENDEL: Entwicklung einer zentralenbasierten ÖPNV-Beschleunigung im Umfeld des Kooperativen Verkehrsmanagements (beteiligt: GEVAS)
- C-Roads: Green Light Optimal Speed Advisory (GLOSA) für den motorisierten Individualverkehr. (beteiligt: GEVAS)
- TRAVOLUTION extended: Ampel-Fahrzeug-Kommunikation und Grundlage Ampelphasenassistent mit Geschwindigkeitsempfehlung (beteiligt: Ingolstadt, CSO)
- 5GoIng: 5G-Innovationskonzept Ingolstadt im Rahmen der 5x5G-Strategie (beteiligt: Ingolstadt, THI, Fraunhofer)
- HarmonizeDD: Durchgehende Unterstützung vernetzten und automatisierten Fahrens im Mischverkehr mit heterogenen Kommunikationstechnologien (beteiligt: Fraunhofer)
- KOALA-II: Car2X-Kommunikation für kooperative Umfeldwahrnehmung und Manöverkoordination (beteiligt: THI)

e) Aktueller Stand Wissenschaft und Technik: Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.

Während des Vorhabens wurden erhebliche Fortschritte bei der Vorhersage von Fahrentscheidungen an Kreuzungen erzielt, insbesondere durch maschinelle Lernmodelle zur Identifizierung von Unsicherheiten in Dilemma-Zonen. Verschiedene Modelle wie SVMs, Entscheidungsbäume, Random Forests, XGBoost und LSTM-Netzwerke wurden eingesetzt. Im Projekt kam jedoch ein Attention-basiertes LSTM-Modell zum Einsatz, das präziser Unsicherheiten in Fahrentscheidungen hervorhebt, insbesondere im Dilemma-Zonenbereich, was mit klassischen oder herkömmlichen LSTM-Ansätzen nicht gleichermaßen möglich ist.

- Qin, Ziye, et al. "Investigating Personalized Driving Behaviors in Dilemma Zones: Analysis and Prediction of Stop-or-Go Decisions." arXiv preprint arXiv:2405.03873 (2024).
- Chouhan, Rajesh, et al. "Dilemma Zone Identification and Mitigation Approach at Signalized Intersections under Mixed Traffic Conditions Using UAV Data." *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems* 151.1 (2025): 04024093.
- Chauhan, Ritvik, and Satish Chandra. "Data-Driven Approach for Prediction of Drivers' Decision in Type-II Dilemma at Signalized Intersection." *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems* 151.1 (2025): 04024086.
- Datta, Suprabeet, and Bhadradi Raghuram Kadali. "Analyzing Drivers' Yielding Dilemma Behavior Towards Pedestrians at Semi-Urban Uncontrolled Intersections on Arterial Roads." Available at SSRN 4939170.

- Najmi, Ahmad, and Hossein Karamad. "Analysis of Driver Behavior and Boundaries of Di-lemma Zone Using Machine Learning Methods at Signalized Roundabouts." Available at SSRN 4798015.rmaßen möglich ist.

Weitere Datensätze, bei denen mittels Videoaufzeichnungen aus der Vogelperspektive Trajektorien- daten erzeugt wurden, wurden im Zeitraum des Projektes veröffentlicht (Moers et al. 2022; Shi et al. 2021; Zheng et al. 2023), ohne jedoch zeitlich und räumlich kontinuierliche Trajektorien zu liefern, die auch vulnerable Verkehrsteilnehmer beachten. Im Rahmen des Forschungsprojektes TEMPUS wurde dazu vom Lehrstuhl für Verkehrstechnik ebenso eine Arbeit veröffentlicht.

- Moers T.; Vater L.; Krajewski R.; Bock J.; Zlocki A.; Eckstein L. (2022) The exiD Dataset: A Real-World Trajectory Dataset of Highly Interactive Highway Scenarios in Germany
- Shi X.; Zhao D.; Yao H.; Li X.; Hale D.K.; Ghiasi A. (2021) Video-based trajectory extraction with deep learning for High-Granularity Highway Simulation (HIGH-SIM)
- Zheng O.; Abdel-Aty M.; Yue L.; Abdelraouf A.; Wang Z.; Mahmoud N. (2023) CitySim: A Drone-Based Vehicle Trajectory Dataset for Safety-Oriented Research and Digital Twins
- Kutsch, A.; Margreiter M.; Bogenberger, K. TUMDOT–MUC: Data Collection and Processing of Multimodal Trajectories Collected by Aerial Drones

Im Bereich der Steuerung von vernetzten und vollautomatisierten Fahrzeugen an Kreuzungen sind im Projektzeitraum folgende Arbeiten mit Relevanz für das Projekt erschienen:

- Niels, T.; Mitrovic, N.; Dobrota, N.; Bogenberger, K.; Stevanovic, A.; Bertini, R.: Simulation-Based Evaluation of a New Integrated Intersection Control Scheme for Connected Automated Vehicles and Pedestrians. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2020, 1-15.
- Niels, T.; Bogenberger, K.; Papageorgiou, M.; Papamichail, I. (2023) Optimization-Based Intersection Control for Connected Automated Vehicles and Pedestrians
- Wu, W.; Y. Liu; W. Hao; G. A. Giannopoulos; Y.-J. Byon (2022) Autonomous intersection management with pedestrians crossing

Zu der realitätsnahen mikroskopischen Simulation von städtischen Netzen ist im Projektzeitraum ebenso eine Arbeit vom Lehrstuhl für Verkehrstechnik veröffentlicht worden:

- Harth, M.; Langer, M.; Bogenberger, K. (2022) Automated calibration of traffic demand and traffic lights in SUMO using real-world observations

f) Zusammenarbeit mit weiteren externen Stellen außerhalb des Konsortiums (Netzwerke, Fachcluster etc.)

Für die Analyse der Audi-Flotten-Trajektorien- daten wurde EDAG beauftragt, CARIAD bei der Leistungs- analyse im größeren Maßstab zu unterstützen. EDAG verbesserte die Code-Pipeline für eine effizien- tere Datenverarbeitung und half bei Analysen wie der Messung von Warteschlangenlängen, der Be- wertung von Signalphasen, der Untersuchung von Bremsmustern sowie der Analyse von Fahr- und Wartezeiten. Die anonymisierten Ergebnisse wurden auf der Datendrehscheibe veröffentlicht, um sie anderen Partnern für Forschung und Entwicklung bereitzustellen.

Für die Auswertung der Drohnendaten wurden die Firma Automatum GmbH zur Extraktion der Trajek- torien, sowie die Firma Bremedia GmbH zur Erstellung der Drohnenvideos in Unterauftrag genommen. Überdies erfolgte für die Recherche zu Möglichkeiten der Datenerhebung aus der Luft Rücksprache

mit mehreren Institutionen, u.a. beispielsweise bavAIRia e.V. (Luft- und Raumfahrtcluster Bayern). Des Weiteren wurden die Erkenntnisse zur Verkehrserhebung mittels Drohnen aus dem Forschungsprojekt TEMPUS eingebracht.

Für die Weiterentwicklung der mikroskopischen Simulation fand ein Austausch mit dem BMDV Projekt SAVeNOW und dem Projekt RealFuture statt. Weiterhin wurden zum Ende des Projektes die Ergebnisse bei der ÖPNV-Priorisierung mit dem Projekt VGI newMIND geteilt und diskutiert.

Für die Bewertung des Rechtsabbiegeverhaltens und das Konzept der Warnfunktion konnte ebenfalls der Kontakt SAVeNOW und dem DLR genutzt werden, insbesondere um das Verhalten von Autofahrern und VRUs besser zu verstehen.

Für die Weiterentwicklung und Verstetigung des HDTs fand ein aktiver Austausch mit den Betreibern intelligenter Infrastruktur in ganz Deutschland innerhalb des Pilotprojekts KoTAM (Koordination der Testfelder Autonome Mobilität in Deutschland) statt.

II. Verwendung der Zuwendung, Durchführung und Ergebnis des Vorhabens

a) Übersicht des Projektverlaufs

Im Folgenden sind die abschließenden Ergebnisse je Arbeitspaket und die Abweichungen vom ursprünglichen Projektverlauf und den ursprünglichen Projektzielen beschrieben.

AP 0 – Organisation und Anforderungen

Die organisatorischen Aufgaben wurden erfolgreich durchgeführt. Es fanden regelmäßig Treffen statt, sowohl Konsortialtreffen (November 2021, Juli 2022, Februar 2023, Oktober 2023) mit allen Projektpartnern, als auch Arbeitspaket-Treffen und Use Case-Treffen. Das Abschlussevent wurde am 11. Juni 2024 in Ingolstadt durchgeführt. Der Workshop mit den Städten hat im Jahr 2021 stattgefunden.

Im Rahmen des AP 0 wurde zudem die Systemarchitektur des Verkehrsmanagementsystems definiert. Die Bekanntmachung der Inhalte mit anderen Städten ist erfolgt, die Abschlussveranstaltung wurde von Vertretern mehrerer Städte besucht.

AP 1 – Stationäre Sensorik

Im Rahmen von AP 1 wurde das High Definition Testfeld (HDT) aufgebaut. Dieses umfasst die Ausstattung von drei Kreuzungen (Schillerstraße – Goethestraße – Friedrich-Ebert-Straße) mit einer Kombination aus Sensormasten, Strecken- und Maststationen. Die Sensormasten sind durch ein lokales Glasfasernetz verbunden, das durch Verwendung des bestehenden Leerrohrsystems mit minimalen Tiefbauaufwand integriert werden konnte. Die Positionierung der Sensormasten wurde strategisch gewählt, um eine optimale Sichtfeldabdeckung der Kreuzungen zu gewährleisten, insbesondere für kritische Rechtsabbiegeszenarien. Mit zwei bzw. drei Sensormasten je Kreuzung wird der gesamte Kreuzungsverkehr erfasst. Jeder Sensormast ist mit einem 360°-LiDAR-Sensor-Cluster und bis zu 3 Thermalkameras ausgestattet. Abbildung 1 zeigt exemplarisch die Konfiguration eines Sensormasten.

Die Maststationen verbinden die Sensormasten mit einem robusten Energie- und Kommunikationsnetz. Dieses bündelt die Sensordaten zentral in den Streckenstationen, wo sie für Live-Anwendungen in Echtzeit verarbeitet werden. Hier kommen ein Perception Backend sowie anwendungsspezifischen Verarbeitungs-Einheiten zum Einsatz. Für Offline-Analysen werden die Rohdaten in dedizierten Speichersystemen abgelegt. Eine Glasfaserverbindung zur Technischen Hochschule Ingolstadt (THI) ermöglicht die Weiterverarbeitung. Eine eigens integrierte Zeitsynchronisationseinheit ermöglicht die Fusion aller Sensordaten einer Kreuzung. Die Verarbeitung der Rohdaten ermöglicht ein präzises, digitales Abbild des Verkehrs, das für Sicherheits- und Steuerungsanwendungen genutzt werden kann.

Vor der Implementierung im realen Umfeld wurde die Sensorik in einem Physikalischen Zwilling auf dem CARISSMA Freiversuchsgelände umfassend erprobt. Hierbei lag der Fokus auf der Kalibrierung der Sensoren, der Überprüfung ihrer Robustheit sowie der generellen Hardware-Erprobung. Nach Abschluss dieser Tests und Umsetzung im HDT konnte das Testfeld zur Lieferung von Daten ab September 2023 bereitgestellt werden (Parallel zur Drohnendatenerhebung durch die TUM). Die finale Abnahme wurde im Oktober 2023 abgeschlossen, einschließlich der Prüfung durch städtische Behörden.

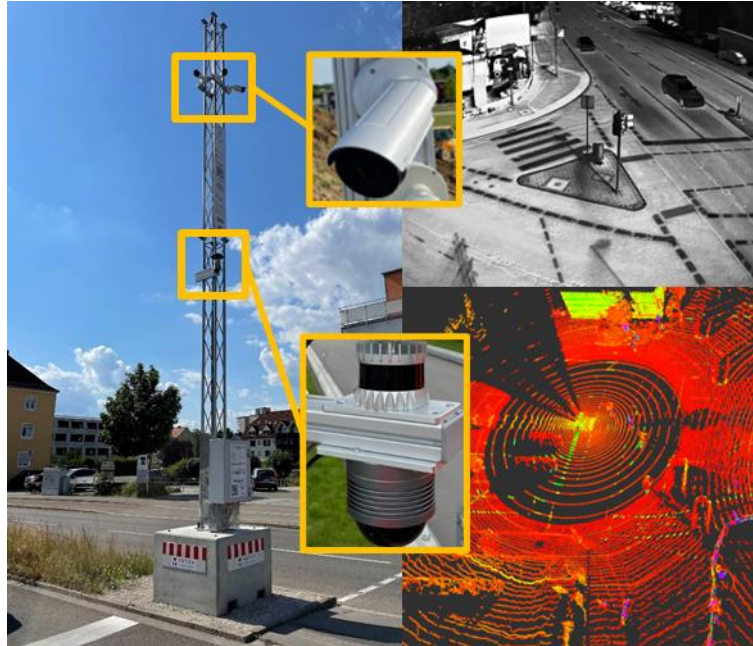


Abbildung 1: Links ist der Aufbau eines HDT-Masts mit Thermalkameras, LiDAR-Sensor-Cluster und Maststation zu sehen. Rechts sind die Rohdaten einer Thermalkamera und des LiDAR-Sensor-Clusters anhand einer Beispielausgabe veranschaulicht.

Anhand der erhobenen Daten wurden KI-Methoden zur Verarbeitung entwickelt. Dazu wurde zunächst eine hochgenaue Lanelet2-Karte für das High Definition Testfeld (HDT) erstellt, die aus drei Schichten besteht: der physikalischen Schicht, welche die geometrische Beschreibung der Umgebung umfasst, der relationalen Schicht, die Beziehungen zwischen einzelnen Straßenobjekten definiert, und der topologischen Schicht, die die Verkehrsführung und Navigationsmöglichkeiten modelliert. Diese strukturierte Karte bildete die Grundlage für die Datenfusion und weitere Analysen. Das HDT wird somit mit 697 Relationen modelliert.

Für die Extrahierung der Rohdaten aus den verwendeten Sensoren wurde für die Thermalkameras ein RTSP-RTP-RTCP-Decoder implementiert, während für die LiDAR-Sensoren ein UDP-Decoder entwickelt wurde. Die Daten wurden dann mittels einer YOLO-V5-1 Netzwerks mit einer Inferenzzeit von ca. 11 ms kategorisiert (in acht Verkehrsteilnehmerklassen) und mit einer Bounding Box markiert. Der Fokus lag dabei auf für Sicherheitsanwendungen echtzeitfähiger Signalverarbeitung. Für das Trainieren der KI-Methode wurde ein großer Datensatz manuell gelabelt. Die zweidimensionalen Bounding Boxes wurden dann aus dem Bild-Koordinatensystem in ein globales 3D-Koordinatensystem transformiert und mittels Extended Kalman Filter nachgebessert.

Für LiDAR-Sensoren wurde mithilfe einer prototypischen Implementierung ein kleiner Datensatz mit Punktwolken und 3D-Bounding-Box-Annotationen erstellt. Auf Basis dieses Datensatzes wurde das 3D-Objekterkennungsnetzwerk „Pointpillars“ trainiert und ausgewertet. Für das HDT wurde diese Methode jedoch nicht übernommen, da die Erstellung eines erforderlichen 3D-annotierten LiDAR-Datensatzes aus Zeit- und Kostengründen nicht möglich ist. Deswegen wurde eine neuartige Methode zur Verarbeitung der LiDAR-Daten eingeführt, die eine Hintergrundsubtraktion in Echtzeit beinhaltet. Dadurch müssen im HDT nur wenige spezifische Teile der Punktwolken verarbeitet werden. Dies führt in den späteren Phasen zu einer effizienteren Verarbeitung und Fusion.

Im Bereich der Open-Set-Erkennung wurden neue Methoden entwickelt, um für die trainierte KI noch unbekannte Objekte in der Umgebung zu identifizieren. Zu diesem Zweck wird eine innovative Multi-Head-Architektur in Kombination mit metrischem Lernen sowie einer neuartigen Fusionstechnik verwendet.

AP 2 – Mobile Sensorik

Die Bereitstellung und Integration von Floating Car Data (FxD) aus Audi-Fahrzeugen wurde durch den Aufbau der erforderlichen Infrastruktur und Kommunikationsprotokolle erfolgreich umgesetzt. Es wurden Methoden zur Datenvorverarbeitung entwickelt, um eine hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit der erfassten Daten zu gewährleisten. Um die Datenqualität sicherzustellen, kamen umfangreiche Prozesse zur Datenbereinigung und -validierung zum Einsatz. Dabei wurden Störungen herausgefiltert und gleichzeitig die Integrität der Daten bewahrt. Es wurde anschließend Datenschutzrechtlich bedingt eine Aggregation der Daten vorgenommen, und die aggregierten Daten mit den Projektpartnern geteilt. Die aggregierten FxD-Daten wurden überdies analysiert, um wesentliche Kennzahlen zur Kreuzungsleistung abzuleiten (Verkehrsstromstärken, Staubetrachtungen). Darüber hinaus wurden anhand der FxD KI-basierte Methoden entwickelt, um die Dilemma-Zone an Lichtsignalanlagen zu ermitteln. Diese Erkenntnisse wurden ebenfalls auf der DataHub-Plattform veröffentlicht.

Die App trafficpilot von GEVAS ist ein Grüne-Welle-Assistent für Fahrzeuge und Radfahrer und kann bei der Verwendung Floating Car und Bicycle Daten erheben. Während dem KIVI-Projekt wurde die trafficpilot App für Verwendung in Ingolstadt freigeschaltet, sodass Daten gesammelt und über die Datendrehscheibe bereitgestellt werden konnten. Die App wurde dann auch für die Fahrrad-Studie verwendet. Für die Bereitstellung der Radfahrdaten wurde der Netzgraph im Verkehrsmanagement stadtweit um die Radfahrwege sowie die Radfurten erweitert und mittels Testfahrten qualitätsgesichert. Darüber hinaus wurden die Versorgung im Verkehrsmanagementsystem um die Radfahrersignale ergänzt, so dass auch Radfahrende eine zuverlässige Signalplanprognose erstellt werden konnte.

Die GPS-Daten der Bus-Flotte wurden ebenfalls über die Datendrehscheibe bereitgestellt.

AP 3 – Datenfusion, -analyse und -prognose

Anforderungen an Output-Daten zur Simulation und Verkehrssteuerung, sowie geeignete Datenformate zur Darstellung von FxD wurden festgelegt. Die Datendrehscheibe wurde erfolgreich in Betrieb genommen. Die Datenplattform wurde dazu genutzt, anonymisierte Fahrrad- und Pkw-Trackingdaten, die durch die sogenannte trafficpilot-App des Projektpartners GEVAS aufgezeichnet worden sind, projektintern bereitzustellen und auszuwerten. Darüber hinaus wurde die Drehscheibe für Daten zur Infrastruktur (LSA, Detektoren), Informationen für C-Call (siehe AP 4) und das Verkehrsmodell DRIVERS, sowie für die FxD und das HDT genutzt.

Um ausreichende Daten zu gewinnen, wurde eine Fahrradstudie organisiert, bei der Teilnehmer im Herbst 2022 über mehrere Wochen ihre täglichen Wege mit dem Fahrrad aufgezeichnet haben. Auf Basis dieser Daten konnten vielversprechende Straßenzüge für potenzielle Grüne Wellen für Radfahrer identifiziert werden.

Die im HDT aufgenommenen Daten der LiDAR Sensoren und Thermal-Kameras wurden zusammengeführt, um die Identifikation von Objekten und die Erzeugung der Trajektorien in einem gemeinsamen, eindeutigen Referenzsystem zu ermöglichen. Dabei wurden sowohl LiDAR-LiDAR als auch LiDAR-Kamera-Fusionen durchgeführt.

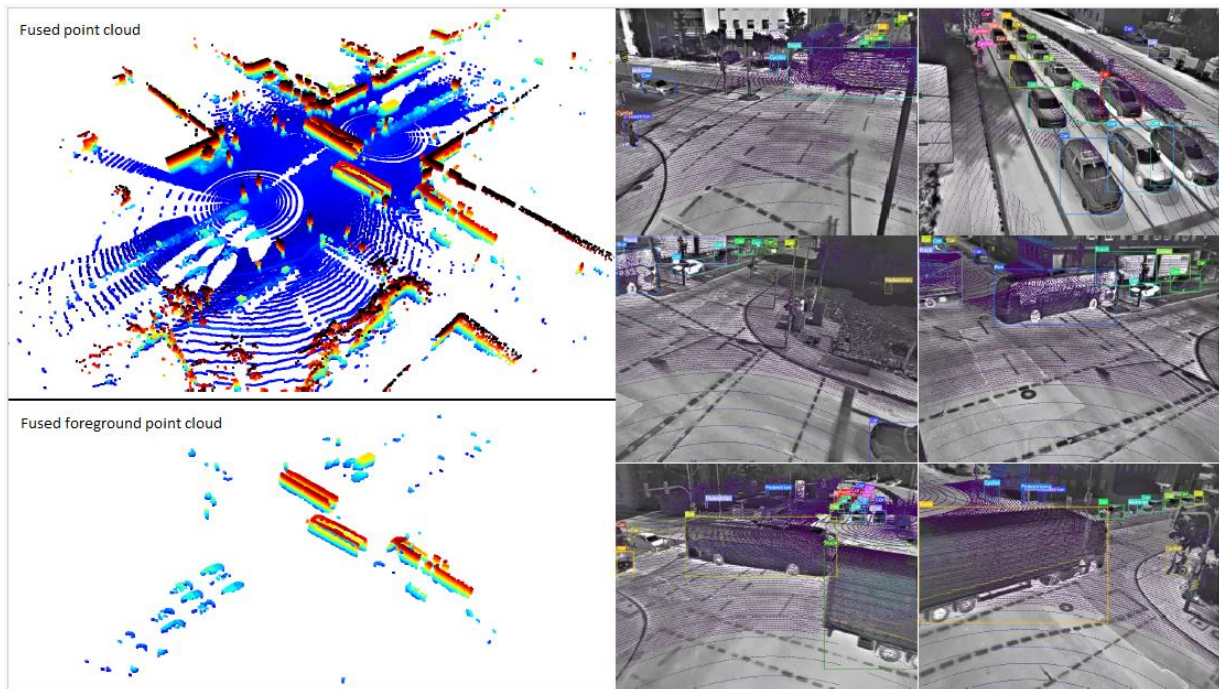


Abbildung 2: Verarbeitete, zeitsynchronisierte Sensordaten aus der Kreuzung 1: Links wird eine georeferenzierte, fusionierte LiDAR-Punktwolke gezeigt, darunter mit „Background Subtraction“. Rechts sind mehrere Aufnahmen der Wärmebildkameras abgebildet. Diese sind mit der fusionierten LiDAR-Punktwolke überlagert. Die detektierten Objekte werden durch Rechtecke markiert.

Die Daten, die in jeder Kreuzung des HDT erfasst werden, erzeugen etwa 180 GB pro Stunde. Dieses große Datenvolumen wird effizient mit KI verarbeitet und für die Fusion vorbereitet. Ein entscheidender Schritt im Fusionsprozess ist die extrinsische Kalibrierung jedes Sensorpaares. Zu diesem Zweck wurde eine neuartige Methode entwickelt, die hochreflektierende Kegel nutzt. Die extrinsischen Kalibrierungen ermöglichen eine präzise und effiziente Projektion der Sensordaten in ein gemeinsames Koordinatenrahmen sowie in die Koordinatensysteme der einzelnen Sensoren. Der finale Algorithmus transformiert zunächst die LiDAR-Daten aller vier Sensoren einer Kreuzung in ein gemeinsames Koordinatensystem. Darauf folgt eine Hintergrundsubtraktion. Anschließend werden die Vordergrund-LiDAR-Daten mit den Schätzungen der Kamerasensoren unter Verwendung einer neuen, selbst entwickelten KI-basierten Fusionsmethode kombiniert. Schließlich werden die Schätzungen mehrerer Kamerasensoren durch Kamera-Kamera-Fusionstechniken weiter fusioniert. Ein Snapshot der im HDT gesammelten Daten, zusammen mit der Signalverarbeitung und der Sensordatenfusion, ist in Abbildung 2 dargestellt.

Auf der Kafka Datenrehscheibe werden die Daten aggregiert dargestellt und umfassen für jeden Verkehrsteilnehmer die quantisierte Positions- und Geschwindigkeitsinformationen, Objektkategorie, Track-ID, Orientierung und Lane-ID. Während die Zustandsschätzungen direkt vom Fusionsmodul stammen, werden die Spur-IDs jedem Objekt auf der Grundlage der Positionsinformationen und der Spursegmentierung zugewiesen. Für die Bewegungsvorhersage wurde ein Extended Kalman Filter - Modell verwendet. Nach erneuter Optimierung der Laufzeit beträgt die gesamte Latenz weniger als 100 Millisekunden (Rohdaten-Dekodierung, Fusion, Erkennung, Tracking, Generierung aggregierter Daten, Kodierung und Hochladen von Daten in die Datendrehschreibe sowie Herunterladen und Dekodieren von Daten auf der Anwendungsseite). Abbildung 3 zeigt eine fusionierte Objektliste, die durch Echtzeitverarbeitung der Sensordaten in einer Birds-Eye-View-Darstellung generiert wird. Zudem wird die virtuelle Segmentierung der 2D-Karte dargestellt, welche verwendet wird, um feinkörnige Informationen für Verkehrssteuerungsalgorithmen über einen Kafka-Server bereitzustellen.



Abbildung 3: Links ist die fusionierte Objektliste die durch Echtzeitverarbeitung der Sensordaten generiert wird, in einer Birds-Eye-View Darstellung inklusive der genutzten Lanelet-Karte zu sehen. Rechts ist die virtuelle Segmentierung der 2D-Karte dargestellt, die dazu dient, feinkörnige Informationen für Verkehrssteuerungsalgorithmen zur Verfügung zu stellen. Diese Informationen werden mit der Objektliste verknüpft und auf dem Kafka-Server aktualisiert.

Zudem wurden stationären Sensordaten aus dem HDT mit den Drohnen- und Daten fusioniert, um beispielsweise die Datengüte abzuschätzen. Modelle zur KI-basierten Rückstaulängenschätzung wurden entwickelt, mit den realen Daten aus dem HDT (Sensorik, Drohnen- und Daten) trainiert und validiert.

Darüber hinaus wurden Verkehrsmuster je Verkehrsmittel identifiziert und Reisezeiten für Fahrradfahrer und Busse simulativ prognostiziert. Die Daten zu der Verspätungslage und Besetzung von Bussen wurden analysiert und für das Training eines KI-Modells zur Prognose zukünftiger Verspätungen und Besetzungsgrade von Bussen verwendet.

Die von der Stadt bereitgestellten Daten zur stadtweiten Parkhaus- und Parkplatzbelegung wurden analysiert und zusammen mit Eventdaten und Wetterdaten zum Training eines KI-Modells verwendet, welches die Parkplatzbelegung und -verfügbarkeit für zukünftige Zeitpunkte vorhersagen kann.

Gegenüber dem Projektvorhaben konnten die mobilen FxD aus den Testfahrzeugen nur teilweise eingesetzt werden, da die Auflösung aufgrund datenschutzrechtlicher Probleme nicht ausreichend genau war. Die aggregierten Daten wurden ausgewertet, sowie aus den vorhandenen Sensor- und den Drohnen- und Daten künstliche FxD erzeugt.

AP 4 – Verbesserung der Verkehrssteuerung

Die online zur Verfügung gestellten Daten aus AP3 wurden für die Verbesserung der Lichtsignalanlagenplanung genutzt. Dabei wurden die Daten mittels eines weiterentwickelten Qualitätsanalyse-Tools von GEVAS Software (VTAnalyzer) analysiert. Dabei werden die Daten für Qualitätsuntersuchungen wie beispielsweise Grüne Welle und/oder LSA/Detektorqualität aufbereitet. Diese Informationen fließen wiederum in CROSSIG ein, um die Planungen der Lichtsignalanlagen zu verbessern. Darüber hinaus wurde der Dienst „Ampelinfo Online (AIO)“ von TTS um den TRENDS Kern 5.3 sowie OCIT-Protokolle

erweitert, um Schaltzeitprognosen für den neuesten Stand der Lichtsignalanlagen gewährleisten zu können.

Im Rahmen von AP 4 wurde eine Anforderungsanalyse zur urbanen Verkehrssteuerung durchgeführt, indem Interviews mit Experten aus den Verkehrssteuerungszentralen von 14 verschiedenen Großstädten innerhalb des DACH-Raums durchgeführt wurden. Dabei wurde ein Überblick über die in der Praxis angewendeten Arten der Verkehrssteuerung sowie zukünftige Ziele und Erwartungshaltungen über Big Data und künstliche Intelligenz in der Verkehrssteuerung erstellt.

Die mikroskopische Verkehrssimulation von Ingolstadt in SUMO wurde deutlich weiterentwickelt und multimodaler gemacht, sowie über die Plattform github veröffentlicht. Durch eine umfangreiche Verortung der Induktionsschleifen und Meldepunkte der ÖPNV-Priorisierung in der Simulationsumgebung und eine Schnittstelle zu Steuerungskern, kann die originale verkehrabhängige Lichtsignalsteuerung inklusive der ÖPNV-Priorisierung simuliert werden. Dadurch konnte eine deutlich bessere und zuverlässigere Basis für den Vergleich der heutigen Steuerung mit neuen lokalen oder netzweiten Steuerungsansätze geschaffen werden.

Eine multimodale Bewertung von Verkehrssteuerungsmaßnahmen über den Multimodalen Performance Index (MPI) wurde entwickelt. Beim MPI werden die Verkehrsparameter (z.B. Verspätungslage, Anzahl an Halten) verschiedener Verkehrsmodi in einem Index zusammengefasst. Es wurden verschiedene Verkehrssteuerungsmaßnahmen simuliert und unter verschiedenen Gewichtungen im MPI bewertet. Die simulierten Verkehrssteuerungsmaßnahmen hatten dabei sowohl lokalen als auch netzweiten Charakter und haben bereits umgesetzte Maßnahmen (z.B. Grüne Welle Pkw) als auch zukünftsträchtige Maßnahmen (z.B. Grüne Welle Radfahrer) umfasst. Der MPI wurde ebenfalls verwendet, um bei den neuen KI-Steuerungsansätzen für Lichtsignalanlagen (Reinforcement Learning) einen umfassenden, multimodalen Bewertungsfaktor ansetzen zu können (z.B. beim Reward).

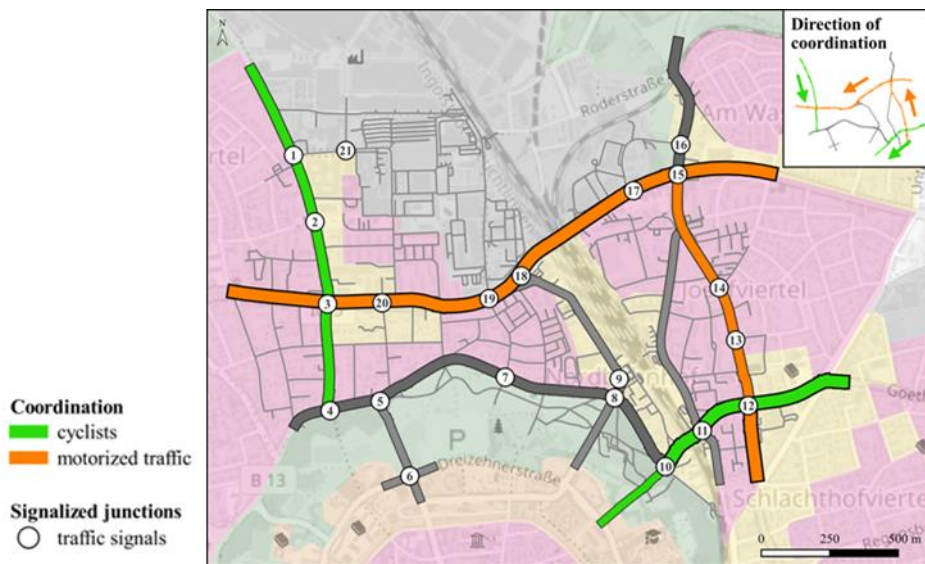


Abbildung 4: Untersuchungsgebiet und Verkehrssteuerungsmaßnahmen (Bus-Priorisierung, Koordinierungen) in Ingolstadt für die Analysen zum Multimodalen Performance Index (MPI)

In diesem Projekt wurde zudem eine Netzsteuerung auf KI-Basis (Reinforcement Learning, RL) entwickelt. Diese Steuerung ist die erste uns bekannte RL-Steuerung, die für eine Umsetzung in der Realität konzipiert wurde. Während bisherige Ansätze in der Literatur eher Aktionen vorgesehen haben, die mit derzeitigen Steuergeräten nicht umsetzbar sind, werden in der RL-Steuerung von KIVI die sogenannten T-Zeiten angepasst, um die Sicherheit und Robustheit der Steuerung zu gewährleisten. Dar-

über hinaus stellt die Verwendung der T-Zeiten sicher, dass die Grünen Wellen weiterhin funktionieren. Um einen akkuraten State und Reward zu erhalten, werden reale Schleifendaten verwendet und in das DRIVERS Modell von GEVAS eingespeist. DRIVERS berechnet daraufhin die Verkehrslage und liefert schließlich die Verkehrsnachfrage für die mikroskopischen Simulationen und damit die Trainingsumgebungen für das RL. Basierend auf dem Training aus den Simulationen lernt das Model, welche T-Zeiten zu empfehlen sind, wenn bestimmte Werte bei den realen Schleifen gemessen und darauf basierend Verkehrslagen in DRIVERS prognostiziert werden.

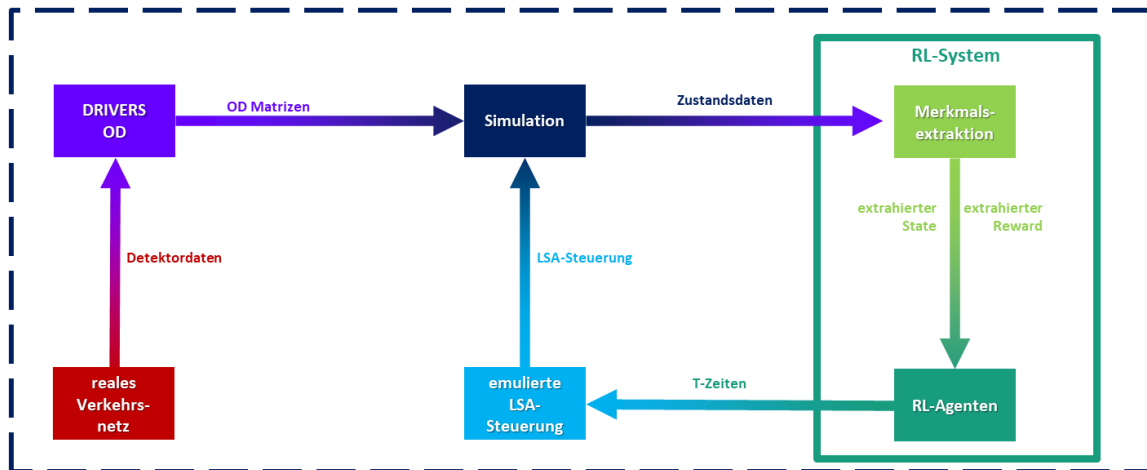


Abbildung 5: Systemarchitektur der RL-Netzsteuerung

Die Bus-Priorisierung ist ein wichtiges Werkzeug der Verkehrssteuerung, um die Attraktivität des ÖPNVs zu erhöhen. Im KIVI-Projekt wurden (1) neue Strategien der Bus-Priorisierung simulativ untersucht, (2) die Technologie C-CALL an den insgesamt 10 Lichtsignalanlagen des Pilotstreckenzuges in der Praxis umgesetzt und (3) die ÖPNV-Ankunftszeitprognose für eine Verbesserung der Priorisierung entwickelt.

Bei der simulativen Untersuchung wurde eine Bus-Priorisierung auf Basis von Verspätungslage und Besetzungsgrad der Busse getestet. Verspätungslage und Besetzungsgrad werden dabei mithilfe eines KI-Modells vorhergesagt, das mit historischen Daten zu Verspätung und Fahrgastzahlen trainiert wurde.

Die zur Verfügung gestellten Daten aus dem HDT und insbesondere von den Bussen wurden außerdem genutzt, um die Busse über die zentralenbasierte ÖV-Priorisierung (C-CALL) zu beschleunigen. Der C-CALL projiziert diese Positionsdaten auf den Netzgraphen des Verkehrsmanagements, ermittelt die angeforderte Signalgruppe und errechnet eine Ankunftsprognose. Diese Daten werden über das standardisierte OCIT-Protokoll aus der Zentrale an die Lichtsignalanlage und damit an das Steuerungsverfahren TRENDS gesendet. Die Versorgung der Steuerungslogik erfolgt über den Verkehrsingenieurarbeitsplatz CROSSIG. Umgesetzt wird der C-CALL mithilfe von VIAP CROSSIG und dem TRENDS Kern. Zur Vorbereitung für den C-CALL wurde außerdem die OCIT-Schnittstelle auf einigen Steuergeräten aufgebaut. Gemeinsam mit dem ITCS-Systemlieferanten wurde eine Schnittstelle zwischen den ITCS- und C-ITS-Systemen entwickelt und umgesetzt. Die Busse der INVG wurden im Laufe des Projektes darüber hinaus auf den 5G-Mobilfunk-Standard hochgerüstet und mit der neuesten Bordrechner-Software ausgestattet. Darüber hinaus wurde ein Rückkanal von der LSA zum Fahrzeug umgesetzt, wodurch der Fahrer eine Rückmeldung zum ÖV-Eingriff am Bordrechner erhält. Eine Geschwindigkeitsempfehlung für ÖV-Fahrzeuge wurde ebenfalls entwickelt und getestet.

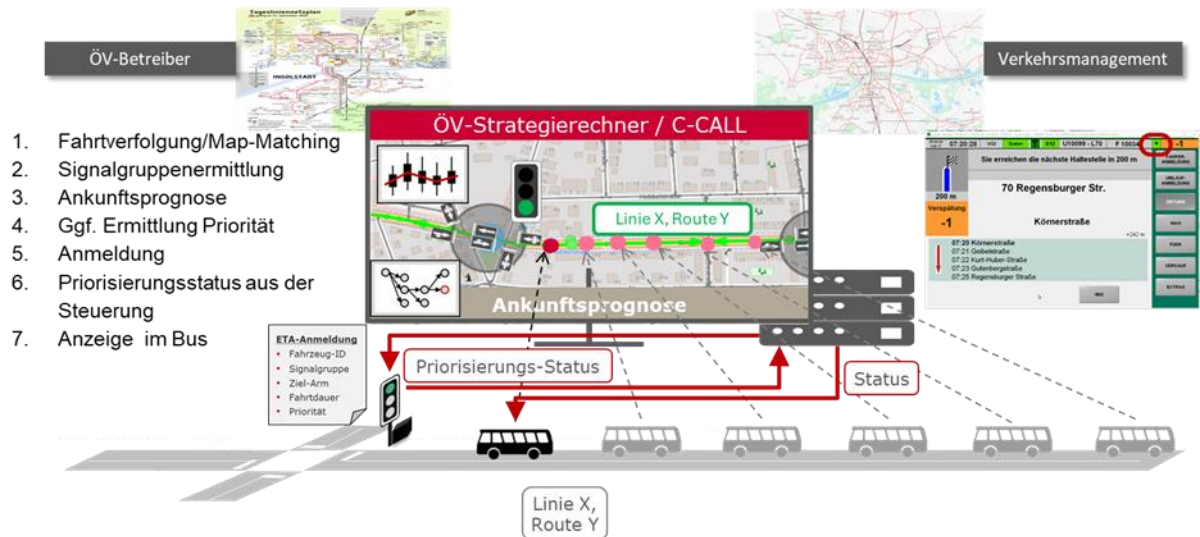


Abbildung 6: Funktionsweise des C-CALLs

Die ÖPNV-Ankunftszeitprognose wurde basierend auf historischen LSA-Prozessdaten und aktuellen Funkmeldepunktplänen und damit ohne Anbindung an eine Betriebsleitzentrale entwickelt. Sie basiert auf maschinellem Lernen und profitiert laut Korrelationsanalyse insbesondere von der Kenntnis über Parameter wie „Wochentag“, „Signalstatus“ oder „Zeit bis Signalwechsel“, da durch diese die Fahrzeit zwischen Meldekettensignifikt beeinflusst wird.

AP 5 – Verbesserung der Verkehrssicherheit

Basierend auf der Sensorik im HDT wurde eine Sicherheitsanwendung (optimaler Warnblinker) demonstriert. Die Grundlage der Verkehrssicherheitsanwendung bildete die Zustandsraumschätzung des HDT. Hierbei wurden Verkehrsdaten aus verschiedenen Quellen integriert, um ein umfassendes Bild der Verkehrslage in Echtzeit zu erzeugen.

Die Situationsinterpretation erfolgte durch die Kombination örtlicher und temporaler Informationen sowie durch prädiktive Analysen basierend auf Lanelet2-Karten. Eine Kritikalitätsschätzung bewertete mögliche Konfliktsituationen anhand der folgenden Metriken:

- Predicted Post-Encroachment Time (PPT): Abschätzung der Zeit, bis zwei Verkehrsteilnehmer denselben Konfliktpunkt erreichen.
- Time-To-Collision (TTC): Berechnung der Zeit bis zu einer möglichen Kollision bei gleichbleibender Geschwindigkeit.
- Distance to Conflict Point (DCP): Messung der verbleibenden Distanz bis zu einem Konfliktbereich.

Anhand dieser Analysen wurden Szenarien in drei Kategorien eingeordnet:

- Unkritische Szenarien, die keine besonderen Maßnahmen erfordern.
- Unkritische Szenarien mit zukünftigem Konfliktpotenzial, bei denen präventive Maßnahmen sinnvoll sind.
- Kritische Szenarien, die sofortige Warnungen und Interventionen verlangen.

Zur visuellen Warnung wurde ein technischer Demonstrator entwickelt, der die Blinkfrequenz in Abhängigkeit von der Kritikalität eines Szenarios zwischen 0 und 5 Hz anpasste. Dies erlaubte eine intuitive und dynamische Kommunikation des Gefahrenpotenzials an Verkehrsteilnehmer. Vor der Integration wurden zunächst risikoreiche und unfallträchtige Szenarien mit einer Unfalldatenanalyse identifiziert. Insbesondere der Konflikt zwischen Rechtsabbiegern (LKWs, Busse, Autos, ...) und kreuzenden

Radfahrern in der Kreuzung Schiller/Goethestraße zeigte dabei hohes Unfallpotential. Durch das HDT und die entwickelte Kritikalitätsschätzung konnte dieses örtliche Risiko weiter quantifiziert werden und mit durchschnittlich vier Konflikten höherer Kritikalität zu Pendlerzeiten bestätigt werden. In Abbildung 7 ist ein Snapshot des Thermalkamerabildes vor dem Rechtsabbiegeszenario und des technischen Demonstrators zu sehen.

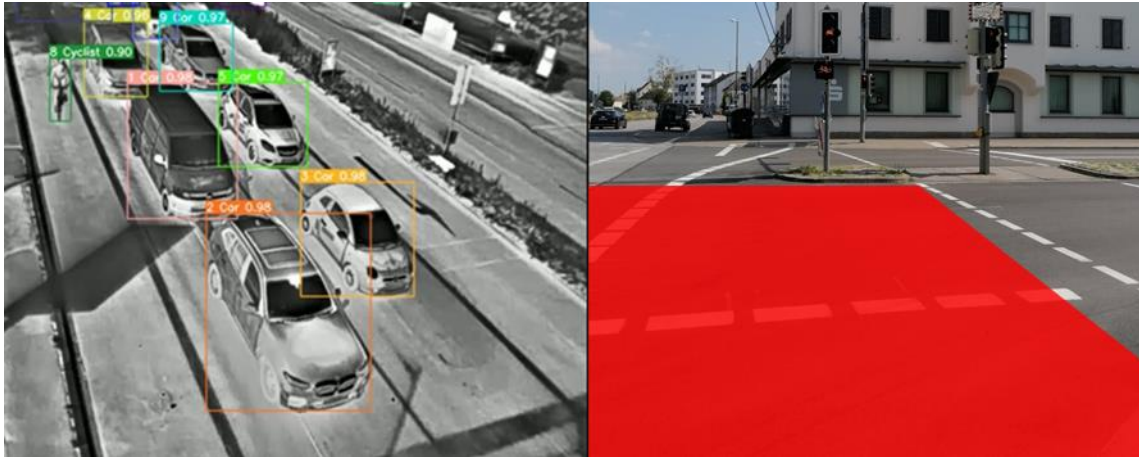


Abbildung 7: Dargestellt ist links das Konfliktszenario zwischen Fahrzeug mit Rechtsabbiegeintention und kreuzendem Radfahrer. Rechts ist der technische Demonstrator der Warnfunktion, dessen Radfahrerblinklicht und die identifizierte kritische Unfallzone zu sehen.

Die echtzeitfähige Verkehrssicherheitsanwendung wurde erfolgreich im HDT implementiert und operierte mit einer Verarbeitungsgeschwindigkeit von 10 Hz. Durch Feedback-Loops mit Nutzern (Studenten, Mitarbeiter der Stadt Ingolstadt und wiss. Mitarbeiter) wurde der Warnalgorithmus iterativ optimiert, um der Subjektivität der erreichten örtlichen Verbesserung gerecht zu werden. Insgesamt können Konfliktsituationen frühzeitig erkannt und Informationen über mögliche Gefahren bereits bei einer Entfernung von mehr als 40 Metern bereitgestellt werden. Bei hoher Unfallgefahr wird etwa 10 Meter vor der Konfliktzone eine spezifische Warnung ausgegeben, angepasst an die örtlichen Gegebenheiten.

AP 6 – Evaluation und Ergebnisverbreitung

Die Gesamtevaluation und Ergebnisverbreitung erfolgte durch die Zusammenstellung des Gesamtschlussberichts aller Projektpartner, Veröffentlichungen der in den einzelnen Arbeitspaketen geleisteten Arbeiten, sowie Vorträge im Rahmen von Konferenzen. Ebenso ist die Übertragbarkeit auf andere Städte durch die jeweiligen Methoden beschrieben.

Die Steuerung von vollautomatisierten und vernetzten Fahrzeugen wurde erfolgreich umgesetzt und für das High Definition Testfeld (HDT) mithilfe der mikroskopischen Simulation SUMO demonstriert. Umgesetzt wurde die Steuerung über eine Optimierung, die die Verspätung der Fahrzeuge an der Kreuzung unter Berücksichtigung möglicher Konflikte minimiert und den Fahrzeugen Ankunftszeiten zuweist, sodass ohne Lichtsignalanlagen gesteuert werden kann. Auch Fußgänger konnten erfolgreich in die Steuerung integriert werden. Auf der SUMO-Konferenz 2024 wurde einem internationalen Publikum präsentiert, wie die Konfliktpunkte für die vollautomatisierte Steuerung automatisch berechnet werden können.

Abweichungen im Projektverlauf und zu ursprünglichen Zielen

Gegenüber dem ursprünglichen Antrag wurden aufgrund der eingeschränkten und verspäteten Datenverfügbarkeit Änderungen vorgenommen.

Aufgrund von Datenengpässen und Lieferverzug durch die pandemische Situation sowie auch der daraus resultierenden temporären Veränderung des typischen Verkehrsgeschehens in Städten wurde eine kostenneutrale Projektlaufzeitverlängerung um 8 Monate erforderlich, um für die Modelle und Algorithmen wieder eine typische und nicht Pandemie-beeinflusste Datengrundlage zu erhalten.

Aufgrund der daraus resultierenden, verspäteten Bereitstellung der Daten aus dem HDT durch die lokalen Projektpartner wegen des verzögerten Aufbaus der Sensorik und aufgrund einer eingeschränkten Datenverfügbarkeit der Fahrzeugflotte konnte die Datenfusion nicht wie geplant stattfinden. Die Verfahren wurden deshalb mittels vorhandener Datensätzen entwickelt, bis die realen Daten zur Verfügung standen. Dazu wurden die entwickelten Datenstandards auf die vorhandenen Daten angewendet, sowie aus einer großen Realdatenbasis artifizuell eine Sensorverfügbarkeit generiert. Anschließend wurden die Methoden anhand der Daten aus Ingolstadt trainiert, getestet und validiert.

Für die Simulation und deren Validierung hatte dies keine Auswirkungen.

Aus oben genanntem Grund wurden zusätzliche Datenquellen genutzt, die auch wertvolle Beiträge zur multimodalen Verkehrslageschätzung liefern konnten. Das waren beispielsweise Daten zur stadtweiten Parkplatzbelegung oder Verspätungslage und Besetzungsgrad von ÖPNV-Bussen. Mithilfe von künstlicher Intelligenz konnte die Parkplatzbelegung in Abhängigkeit von Tageszeit, Wetter und Events vorhergesagt werden, ebenso wie eine ÖPNV-Priorisierung unter Berücksichtigung von Verspätungslage und Besetzungsgrad konzeptioniert werden. Eine weitere ungeahnte Datenquelle konnte durch die Fahrradstudie geschaffen werden, bei der Radfahrer über mehrere Wochen hinweg ihre täglichen Wege aufgezeichnet haben, wodurch Rückschlüsse auf die Routenwahl der Radfahrer gezogen werden konnte.

Eine technische Lösung für eine Geschwindigkeitsempfehlung für ÖPNV-Fahrzeuge wurde technisch umgesetzt und der Funktionsnachweis erbracht, allerdings wurde diese Funktion aufgrund von noch vorhandenen Bedenken hinsichtlich der Betriebssicherheit vorerst nicht in den Regelbetrieb übernommen.

b) Darstellung und Begründung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Stadt Ingolstadt:

- **UA APs 0, 2, 4, 6 Unterauftrag für Ingolstädter Verkehrsgesellschaft mbH (INVG)** für Bereitstellung ÖV-Daten, Integration Geschwindigkeitsempfehlung in Busse und Erfahrungen ÖPNV-Beschleunigung bei der Entwicklung der multimodalen Steuerung, ursprünglich geplant mit 596.960 € (brutto 709.073,40 €). Der Kostenumfang für den Unterauftrag der INVG (**brutto 700.436,31 €**) wurde eingehalten, es gab nur geringfügige Abweichungen. Für die Umsetzung des Forschungsvorhabens KIVI wurden Personalleistungen der INVG zur Betreuung des Vorhabens und Mitarbeit im Projekt durch die INVG in vollem Umfang erbracht. Die Fremdleistungen für die Systemerweiterung durch den ITCS-Systemlieferanten INIT, insbesondere für Lizenzkosten und Umsetzung der ITCS-C-Call-Schnittstelle wurden vollständig umgesetzt und abgerechnet. Darüber hinaus wurden die Fremdleistungen für Datenanalysen und fachliche und persönliche Unterstützung im Projekt durch GEVAS Ingenieure gemäß dem Angebot beauftragt und ohne Minder- bzw. Mehrleistungen erbracht und abgerechnet.

- **UA AP 4 Softwareerweiterungs-, Integrations- und Datenversorgungsleistungen**, ursprünglich geplant mit 315.767 €. Die Ausgaben entsprechen dem Kostenansatz in der Vorhabensbeschreibung. Im Rahmen des Unterauftrags wurde die Erweiterung der Hardware des Verkehrsmanagementsystems (VMS) inkl. Installation und Integration durch GEAVS durchgeführt. Zudem unterstützte GEVAS als Lieferant des Verkehrsmanagementsystems die Stadt Ingolstadt im Testfeldmanagement, da nahezu alle zentralenbasierten Applikationen direkt oder Daten mit dem VMS austauschen bzw. auf Servern im VMS betrieben werden. Dazu wurden u.A. spezifische Systemanpassungen während der Projektlaufzeit vorgenommen, um die diversen Use Cases im Projekt zu unterstützen. Um Daten im Projekt zwischen den Partnern auszutauschen wurde ein Betrieb spezieller Projekt-Komponenten im Testfeld während der Projektlaufzeit im Produktivsystem gewährleistet, der eine merklich gestiegene Datenlast ohne Einschränkungen des operativen Systems ermöglicht. Um die im Projekt benötigten Datenarten der Infrastrukturseite zu unterstützen, erfolgte eine Erweiterung der Schnittstelle am VMS zum OCIT-Verkehrssrechner. Hierzu wurden u.A. Fahrzeuganmeldungen der erfassten Modi an den LSA, OCIT AP-Werte und Daten aus dem „High-Definition Testfeld“ ans Verkehrsmanagement übertragen. Die Schnittstellen wurden qualitätsgesichert. Für den ÖPNV wurde eine Schnittstelle zum ITCS definiert und zu implementiert, die einen kontinuierlichen Datenaustausch (in Echtzeit) zwischen der VGI/INVG und dem Verkehrsmanagement der Stadt gewährleistet. Um die neuen Daten des ÖPNV verarbeiten zu können wurde im Rahmen des Unterauftrags die Planung der 9 Lichtsignalanlagen angepasst und qualitätsgesichert.
- **Sachmittel Austausch Steuergeräte und Projektierungskosten, Anpassungsmaßnahmen**, ursprünglich geplant mit 353.000 €. Für das Forschungsprojekt wurden die Signalanlagen ausgetauscht. Die Signalanlagen sind mit der neuesten TrendsKern-Version 5.3.49 versorgt und an den OCIT-Rechner angeschlossen. Während der Umbaumaßnahmen wurden die Signalanlagen abgeschaltet und Verkehrssicherungsmaßnahmen durchgeführt. Teilweise wurden dazu mobile Signalanlagen aufgebaut. Aufgrund von diversen Baustellen im Testgebiet wie auch Beschaffungsproblemen beim Signalanlagenhersteller kam es zu Verzögerungen in den Ausführungen. Die Ausgaben von ca. 334.000 Euro bewegen sich im Rahmen des Kostenansatzes.

THI:

- **Vergabe von Aufträgen:** Im Rahmen des Projekts wurden Gesamtausgaben in Höhe von 897.290,97 € für die Vergabe von Aufträgen getätigt. Diese Mittel waren notwendig, um den Aufbau des HDTs (Arbeitspaket 1) professionell und effizient umzusetzen. In enger Abstimmung mit dem Projektträger und dem Fördermittelgeber wurde durch Fremdvergaben ein rechtlich abgesicherter Aufbau des HDTs gewährleistet. Die Hauptausgaben umfassen verschiedene Dienstleistungen und Bauarbeiten. So wurden 142.650,56 € für Beratungsleistungen eines Ingenieurbüros aufgewendet, das die verkehrstechnische Fachplanung, Ausschreibungen, Umsetzung und Abnahmen an drei Kreuzungen mit je zwei Maststandorten gemäß HOAI übernahm. Für die rechtliche Begleitung der Bauausschreibung und Vergabe wurden 16.751,23 € an eine auf europäisches Baurecht spezialisierte Rechtsanwaltskanzlei gezahlt. Den größten Teil der Kosten machten die Bauausführungen aus, die 711.020,91 € beanspruchten. Diese umfassten Verkehrssicherungsmaßnahmen, Aufbau der Anlagen sowie Erd- und Verkabelungsarbeiten an den drei HDT-Kreuzungen. Insgesamt wurde das Vorhaben erfolgreich innerhalb der finanziellen Vorgaben der Bewilligungsposition 0835 umgesetzt und blieb dabei im Rahmen der 20%-Richtlinie
- **Gegenstände/Investitionen:** Die Gesamtausgaben für Investitionen beliefen sich auf 625.996,24 €. Diese Mittel dienten der Beschaffung von Hardware für das HDT, den Refe-

renzaufbau auf CARISSMA Outdoor sowie die Datenverarbeitung. Zu den Hauptausgaben zählen die Datenverarbeitungsrechner für das HDT (35.285,25 €), Streckenstationsgehäuse (30.872,12 €) und Thermalkamerasensoren (17 Stück) für 84.365,63 €. Darüber hinaus wurden 270.686,51 € in ein LiDAR-Cluster-System für das HDT investiert, während ein weiteres LiDAR-Cluster-System für den Referenzaufbau mit Kosten von 69.234,20 € zu Buche schlug. Ergänzend wurden 23.655,81 € für Datenspeicher für das HDT bereitgestellt. Das Vorhaben konnte erfolgreich im Rahmen der finanziellen Vorgaben der Bewilligungsposition 0850 umgesetzt werden und hielt sich ebenfalls an die 20%-Richtlinie.

c) Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Durch die entwickelten Methoden konnten große Fortschritte hinsichtlich Datenerhebung, Datenfusion und der Integration von stationärer und mobiler Sensorik erzielt werden. Überdies wurde durch die Entwicklung neuer Verkehrssteuerungsansätze mit multimodalem Fokus, sowie die Methoden zur Verkehrslage- bzw. Rückstaulängenschätzung und der Trajektorien Daten öffentlich frei zugänglicher Mehrwert geschaffen (veröffentlichte multimodale, mikroskopische Verkehrssimulation; veröffentlichte Trajektorien Daten aus den Drohnenflügen). Durch die Umsetzung kann der Verkehr nachhaltiger und fairer gesteuert werden, Umweltbelastungen reduziert werden, sowie komfortablere und sicherere Kreuzungsüberfahrten für verletzte Verkehrsteilnehmer ermöglicht werden. Darüber hinaus hat die Betrachtung der Verkehrssteuerung unter vollautomatisiertem Verkehr einen hohen Innovationscharakter und trägt dazu bei, die Chancen des autonomen Fahrens besser zu bewerten.

Durch die Trajektorien Daten aus der Fahrzeugflotte konnte CARIAD Kennzahlen wie Wartezeiten, Staulängen, Geschwindigkeiten, Bremsmustern, Fahrzeiten zwischen Kreuzungen bestimmen, auf deren Basis Verkehrssteuerungs- und Sicherheitsmaßnahmen beurteilt werden können. Weiterhin konnte mit den Daten die Dilemma-Zone untersucht werden, die einen erheblichen Einfluss auf die Verkehrssicherheit an Kreuzungen hat. Angemessene Ressourcenzuweisung ermöglichte dabei eine präzise Analyse.

Durch die zentralenbasierte ÖV-Priorisierung wurde ein Produkt geschaffen, welches zukünftig die ÖV- und Einsatzfahrzeugpriorisierung auf ein neues Level hebt, indem die Ankunftszeit der Fahrzeuge nicht mehr basierend auf historischen Daten in der Steuerung geschätzt wird, sondern basierend auf verschiedenen Datenarten zentral und lernend prognostiziert wird. Während in der Vergangenheit lediglich ÖV-Fahrzeuge dezentral mit hohem Hardwareaufwand (Funkmeldeempfangseinheit) priorisiert wurden, ist der zentrale Ansatz mit C-CALL universeller, kostengünstiger und schneller stadtwweit zu realisieren.

Der Personaleinsatz der INVG war erforderlich, um die Begleitung des Projekts sowie die Mitarbeit an allen für den ÖPNV relevanten Arbeitspaketen zu gewährleisten und die Systemumstellung/ Migration im laufenden Betrieb zu ermöglichen. Die Fremdleistungen der INVG für die Systemerweiterung durch den ITCS-Systemlieferanten INIT wurden für die erforderlichen Lizenzkosten und für die Entwicklung und technischen Umsetzung der Schnittstelle zwischen dem bestehenden ITCS-System der INVG und dem neuen System C-Call zur Umstellung der heutigen ÖPNV-Priorisierung mittels analoger Funktelegramme auf eine innovative digitale Mobilfunktechnologie aufgewendet. Die Fremdleistungen von GHP waren im geplanten Umfang notwendig, um die INVG während des gesamten Projektes im laufenden Betrieb fachlich und personell bei der Planung, Entwicklung, Einführung und Qualitätssicherung der Systemumstellung sowie bei der Mitarbeit in weiteren Arbeitspaketen zu unterstützen und zu entlasten.

Das Emulatorverfahren von TTS Europe liefert seit Einführung von „Ampelinfo Online“ bei Audi sekundlich präzise Prognosen. Es spiegelt die reale Steuerungslogik in einer virtuellen Umgebung und

erzielt mit fehlerfreien Prozessdaten und geringen Latenzzeiten (ca. 2 Sekunden) qualitativ hochwertige Ergebnisse. Die korrekte Abbildung aller Steuerungsparameter ist entscheidend, da selbst minimale Abweichungen Prognosefehler verursachen können. Durch zusätzliche verkehrliche Eingangsdaten wurde die Verkehrssteuerung erweitert, wobei die entwickelte Kernversion 5.3 genaue Prognosen ermöglicht. Besonders relevante Faktoren sind Fußgängerschutzanlagen und ÖV-Meldekettensysteme, die Steuerungslogiken beeinflussen. Mit einer Abschätzung künftiger ÖV-Anmeldungen lassen sich Prognosesprünge reduzieren, was die Qualität aller SPaT-Anwendungen deutlich verbessert.

Die KI-basierte adaptive Netzsteuerung passt in den aktuellen Zeitgeist. Netzsteuerungen sind in deutschen Städten nur vereinzelt anzutreffen, da diese aufwändig in der Versorgung und im Betrieb sind. Die hier entwickelte Netzsteuerung hat das Potenzial leicht auf andere Städte übertragbar zu sein, da die Verkehrssituationen von der KI erlernt werden und damit wartungsarm und kostengünstiger (abgesehen von den Energiekosten) sind.

d) Darstellung des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Wertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans)

In projektbegleitenden Dissertationen, einer Vielzahl an projektbegleitenden studentischen Abschlussarbeiten sowie zahlreichen nationalen sowie internationalen Veröffentlichungen während und nach der Projektlaufzeit wurden die Ergebnisse einem breiten Fachpublikum dargestellt und stärken somit das internationale Ansehen und den Wissenschaftsstandort Deutschland. Folgende Veröffentlichungen sind aus dem KIVI-Projekt heraus entstanden:

- **Chandra Sekaran, Karthikeyan; Balasubramanian, Lakshman; Botsch, Michael; Utschick, Wolfgang:** “Metric Learning Based Class Specific Experts for Open-Set Recognition of Traffic Participants in Urban Areas Using Infrastructure Sensors.” IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2023
- **Botsch, Michael; Huber, Werner; Balasubramanian, Lakshman; Flores Fernández, Alberto; Geisler, Markus; Gudera, Christian; Gomez, Mauricio; Riegl, Peter; Sanchez Morales, Eduardo; Sekaran, Karthikeyan:** “Data Collection and Safety Use Cases in Smart Infrastructures”. International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, 2023
- **Chandra Sekaran, Karthikeyan; Balasubramanian, Lakshman; Botsch, Michael; Utschick, Wolfgang:** “Open-Set Object Detection for the Identification and Localization of Dissimilar Novel Classes by means of Infrastructure Sensors.” IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2024
- **Dahmen, Victoria; Loder, Allister; Tilg, Gabriel; Kutsch, Alexander; Bogenberger, Klaus:** “Traffic State Estimation with Loss Constraint.” IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, 2022
- **Ilic, Mario; Sautter, Natalie; Margreiter, Martin; Loder, Allister; Bogenberger, Klaus:** “Changing Strategic Alignments in European Urban Traffic Control – Requirements for Future Developments”. hEART - 10th Symposium of the European Association for Research in Transportation, 2022
- **Ilic, Mario; Sautter, Natalie; Margreiter, Martin; Loder, Allister; Bogenberger, Klaus:** “Revisiting Urban Traffic Control in Austria, Germany and Switzerland - Requirements for Future Developments”. Transportation Research Board - 101st Annual Meeting 2022, 2022
- **Kutsch, Alexander; Loder, Allister; Tilg, Gabriel; Bogenberger, Klaus:** “Extended Urban Traffic State Estimation Using Different Sensor Strategies.” Annual Meeting of the Transportation Research Board (TRB), 2023

- **Kutsch, Alexander; Kessler, Lisa; Steinmetz, Natalie; Bogenberger, Klaus:** “Dynamic Queue Length Estimation Based on Urban Drone Observations Using Machine Learning Approaches.” 103rd Annual Meeting of the Transportation Research Board (TRB), 2024
- **Matiunina, Daria; Sautter, Natalie; Loder, Allister; Bogenberger, Klaus:** “Predicting Parking Occupancy with Deep Learning on Noisy Empirical Data”. 2023 8th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS), IEEE, 2023.
- **Meess, Henri; Gerner, Jeremias; Hein, Daniel; Schmidtner, Stefanie, Elger, Gordon, Bogenberger, Klaus:** “First steps towards real-world traffic signal control optimisation by reinforcement learning.” *Journal of Simulation*, 1-16, 2024
- **Meess, Henri; Gerner, Jeremias; Hein, Daniel; Schmidtner, Stefanie, Elger, Gordon:** “Reinforcement learning for traffic signal control optimization: A concept for real-world implementation.” *Proceedings of the 21st International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems* (pp. 1699-1701), 2022
- **Meess, Henri; Gerner, Jeremias; Hein, Daniel; Schmidtner, Stefanie, Elger, Gordon:** “Real World Traffic Optimization by Reinforcement Learning: A Concept.” *International Workshop on Agent-Based Modelling of Urban Systems (ABMUS) Proceedings: 2022* (pp. 49-54), 2022
- **Song, Rui;** Zhou, Liguu; Lyu, Lingjuan; **Festag, Andras;** Knoll, Alois: "ResFed: Communication-Efficient Federated Learning With Deep Compressed Residuals," in IEEE Internet of Things Journal, Vol. 11, No. 6, pp. 9458-9472, 2023
- **Song, Rui;** Xu, Runsheng; **Festag, Andreas;** Ma, Jiaqi; Knoll, Alois: "FedBEVT: Federated Learning Bird's Eye View Perception Transformer in Road Traffic Systems," in IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, Vol. 9, No. 1, 2024, pp. 958-969.
- **Song, Rui;** Lyu, Lingjuan; Jiang, Wei; **Festag, Andreas;** Knoll, Alois: "V2X-Boosted Federated Learning for Cooperative Intelligent Transportation Systems with Contextual Client Selection," in ICRA Workshop on Collaborative Perception and Learning, London, United Kingdom, 2023.
- **Song, Rui;** Liu, Dai; Chen, Dave; **Festag, Andreas;** Trinitis, Carsten; Schulz, Martin; Knoll, Alois: "Federated Learning via Decentralized Dataset Distillation in Resource-Constrained Edge Environments," in International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 2023.
- **Song, Rui;** Zhou, Liguu; Lakshminarasimhan, Venkatnarayanan; **Festag, Andreas;** Knoll, Alois: “Federated Learning Framework Coping with Hierarchical Heterogeneity in Cooperative ITS.” IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Macau, China, 2022.
- **Song, Rui;** Hegde, Anupama; Senel, Numan; Knoll, Alois, **Festag, Andreas:** “Edge-aided Sensor Data Sharing in Vehicular Communication Networks.” IEEE 95th Vehicular Technology Conference (VTC), Helsinki, Finnlands, 2022.
- **Sautter, Natalie; Kessler, Lisa; Belikhov, Danil; Bogenberger, Klaus:** “Multimodal Performance Evaluation of Urban Traffic Control: A Microscopic Simulation Study”. 4th Symposium on Management of Future Motorway and Urban Traffic Systems 2022 (MFTS2022), 2022
- **Sautter, Natalie; Kessler, Lisa; Belikhov, Danil; Bogenberger, Klaus:** “A Multimodal Performance Index for the Evaluation of Urban Traffic Control Measures”. 2023 8th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS), IEEE, 2023.
- **Schmidt, Katia Juliane; Steinmetz, Natalie; Margreiter, Martin:** “Bus Priority Procedure for Signalized Intersections Based on Bus Occupancy and Delay”. SUMO User Conference, 2024.
- **Steinmetz, Natalie; Niels, Tanja; Bogenberger, Klaus:** „Automated conflict region calculation for intersection control with automated and connected vehicles“. SUMO User Conference, 2024.

Darüber hinaus fließen die Ergebnisse des KIVI-Projektes in die studentische und berufliche Aus- und Weiterbildung ein:

- Bachelorstudiengänge 'Bauingenieurwesen' und 'Umweltingenieurwesen' an der TU München
- Masterstudiengänge 'Bauingenieurwesen', 'Verkehrssysteme/Transportation Systems', 'Umweltingenieurwesen' an der TU München
- Masterstudiengang 'Transport and Logistics' an der TUM Asia in Singapur
- Masterstudiengang 'AI Computing and Connectivity Technologies' an der Technischen Hochschule Ingolstadt
- Masterstudiengänge „Automatisiertes Fahren und Fahrzeugsicherheit“ sowie „International Automotive Engineering“ an der TH Ingolstadt

Beispielsweise wurden die neuartigen Erhebungsmethoden speziell in die Bachelorveranstaltung „Ergänzungsmodul Verkehrstechnik“, sowie der Masterveranstaltung „Traffic Data Collection“ integriert, um den Studierenden den aktuellen State-of-the-art mitzugeben. Außerdem wurden mehrere Erkenntnisse aus dem Projekt in die zum Wintersemester 2024/2025 neu aufgesetzte Masterveranstaltung „AI in Traffic Engineering“ integriert. Die TUM kann die Erkenntnisse auch nach Ende des Projektes in den oben genannten Studiengängen weitenutzen durch einerseits Einbringung in die Lehre und andererseits auch durch Vergabe von Projekt- und Abschlussarbeiten.

Die im Projekt erzielten Ergebnisse zur Vorhersage von Dilemma-Zonen und Analyse von Fahrzeugbewegungen können die Effizienz und Sicherheit von Verkehrssystemen verbessern. Sie eröffnen wissenschaftliche und wirtschaftliche Perspektiven im Bereich der Optimierung des Verkehrsmanagements an Kreuzungen und Fahrzeug-Infrastruktur-Interaktion für autonome und vernetzte Fahrzeuge. Die entwickelten Ansätze sollen in künftigen Projekten weiter erforscht und kommerziell genutzt werden. Zu den Dilemma-Zonen sind dabei schon Einreichungen bei dem Transportation Research Board (TRB) und der IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC) geplant.

Die mittels Drohnen erhobenen Trajektoriendaten werden derzeit aufbereitet und im Anschluss als Open Source Daten für wissenschaftliche Zwecke zur Verfügung gestellt (Lizenz: Creative Commons CC BY-NC 4.0). Weitere Möglichkeiten (neben der im Projekt verfolgten Ziele) der wissenschaftlichen Verwertung des Datensatzes ist die Untersuchung der Kapazität von Knotenpunkten unter Berücksichtigung von VRU, die Untersuchung von sicherheitskritischen Situationen über Ersatz-Sicherheitskriterien (Surrogate Safety Measures) und die Überprüfung und Verbesserung von Verhaltensmodellen von Fußgängern und Radfahrern. Ebenso können mikro- und makroskopische Parameter für VRU weitergehend untersucht werden.

Die Methoden und Entwicklungen im Bereich C-CALL und KI-basierte Netzsteuerung, aber auch der Datendrehscheibe werden in das Produktportfolio der Firma GEVAS Software aufgenommen. Die prototypischen Entwicklungen werden in reale Produkte überführt und wirtschaftlich verwertet mit dem Ziel den Verkehrsfluss in anderen Städten nachhaltig zu verbessern und die Emissionen zu senken.

Die Projektergebnisse wurden beim Abschlussevent präsentiert. Dieses war öffentlich zugänglich und wurde von Vertretern mehrerer deutscher Städte und relevanter Praxispartner besucht.

e) Darstellung des fortgeschriebenen Datenmanagementplans

Ein Teil der raumzeitlich synchronisierten Multimodaldata des HDT, die für die Aufgabe der Open-Set-Erkennung besonders relevant sind, wurde durch zwei internationale Konferenz-veröffentlichungen von AININ öffentlich zugänglich gemacht. Die Sensorrohdaten stehen auch nach Projektende öffentlich zur Verfügung und können von der Fachgemeinschaft z. B. für die Forschung im Bereich der multimodalen Umweltwahrnehmung und -optimierung verwendet werden.

Basierend auf Daten aus dem HDT soll Ende 2024 ein multi-modaler kooperativer Wahrnehmungsdatensatz von der Technischen Hochschule Ingolstadt aufgezeichnet und aufbereitet werden. Der Datensatz soll 2025 öffentlich zugänglich gemacht werden. Neben Daten aus dem HDT soll er Daten von mehreren Sensoren, die in Fahrzeugen integriert sind, enthalten. Wissenschaftler sollen den Datensatz verwenden können, um Algorithmen für kooperative Wahrnehmung in autonomen Fahrzeugen und intelligenter Infrastruktur zu entwickeln und zu testen. Der Datensatz kann auch zur Verbesserung von Sensorfusionstechniken und zur Erhöhung der Sicherheit in vernetzten Verkehrssystemen beitragen.

Für die Verkehrslageschätzung von CARIAD wurde rohes Trajektorienmaterial aus der Audi-Flotte anonymisiert und für die Leistungsanalyse in Durchschnittswerte umgewandelt. Die aufbereiteten Daten wurden anschließend über die Datendrehscheibe mit anderen Partnern geteilt. Für die Vorhersage der Dilemma-Zone wurden ebenfalls rohe Trajektorienmaterial genutzt. Derzeit wird versucht, einen Teil dieser Rohdaten für die Veröffentlichung vorzubereiten, jedoch gibt es rechtliche Unsicherheiten, die eine endgültige Freigabe der Daten noch nicht ermöglichen. Es ist daher noch nicht sicher, ob und in welchem Umfang die Rohdaten veröffentlicht werden können.

Im Projekt wurden durch die INVG archivierte Daten und Echtzeit-Daten der Busse zur Verarbeitung in unterschiedlichen Arbeitspaketen zur Verfügung gestellt. Diese Daten stehen weiterhin zur Verfügung und können auch in Zukunft von der Fachgemeinschaft genutzt werden. Aktuell werden die Daten z.B. im Förderprojekt newMIND weiterverwendet. Für die Qualitätssicherung im Projekt wurden vorhandene Datenbanken und Werkzeuge erweitert und angepasst sowie neue Anwendungen entwickelt. Es ist vorgesehen, das im Projekt erarbeitete Datenmanagement weiterhin im Regelbetrieb anzuwenden sowie zukünftig in Hinblick auf qualitative Aspekte und Effizienz weiterzuentwickeln.

Die im Projekt aufgesetzte Datenrehscheibe wird für die, im Rahmen des Bayerisches Verbundforschungsprogramm (BayVFP) des Freistaates Bayern (Förderlinie "Digitalisierung") geförderten, Forschungsprojekte ReaLFutuRe (Reinforcement Learning basierte Verkehrsoptimierung sowie Folge- und Nutzenabschätzung für urbane Regionen) und DISRUPT (Decentralized Intelligent System for Road User Prediction and Tracking) weiterbetrieben. Hierfür werden Daten der Stadt Ingolstadt (Detektordaten und Signalschaltzustände), des Verkehrsverbunds Großraum Ingolstadt (Positionsmeldungen der Busse) und aufbereite Daten von GEVAS (Verkehrslage, Verkehrsprognose und Positionsdaten der trafficpilot App) an die Projektpartner verteilt.

Die während des Projektes durch die TTS Europe GmbH umgesetzte Langzeitspiegelung der Datendrehscheibe diente für die Projektpartner als Rückfallebene im Falle der Notwendigkeit zeitlich erweiterter, historischer Datensätze welche über den Vorhaltezeitraum der eigentlichen Datendrehscheibe hinaus gingen. Auf Basis dieser umfassenden Datensätze konnten Modelle trainiert, Simulationsumgebungen kalibriert und verkehrskritische Szenarien rekonstruiert werden. Im Sinne einer diskriminierungsfreien Datenbereitstellung stehen die im Projekt erhobenen Daten auch nach Projektende weiterhin sämtlichen Interessenten, auch Dritten, zur Verfügung.

Die für die Anwendung der Verkehrssteuerung implementierte, mit Realdaten kalibrierte, mikroskopische Simulation (für das Open Source Simulationstool SUMO) von Ingolstadt ist über die GitHub-Seite des Lehrstuhls für Verkehrstechnik ebenfalls frei verfügbar.

Die mittels Drohnen erhobenen Trajektorien- und Sensordaten werden derzeit aufbereitet und im Anschluss als Open Source Daten für wissenschaftliche Zwecke zur Verfügung gestellt (Lizenz: Creative Commons CC BY-NC 4.0)

f) Darstellung der durchgeführten öffentlichkeitswirksamen Maßnahmen.

Die Ergebnisse des KIVI-Projekts wurden auf einer Vielzahl an nationalen und internationalen Konferenzen präsentiert und beworben. Weitere Aufmerksamkeit kam dem Projekt zuteil durch die Anmeldung von KIVI zum Deutschen Mobilitätspreis (DMP) und der Vorstellung im Bayerischen Rundfunk mit Interviews der IFG, THI und AININ.

Es fanden folgende Fernsehauftritte der THI und AININ statt:

- **ARTE TV**, Autonomes Fahren dank Künstlicher Intelligenz (08/2023)
- **SAT 1**, Autonomes Fahren, wie weit ist die Forschung (12/2022)
- **Bayerischer Rundfunk**, Künstliche Intelligenz im Ingolstädter Verkehr (09/2023)

Es wurden folgende Veranstaltungen besucht:

- **Demonstration von HDT-Anwendungen:** Die Sensorik und Algorithmik des HDT wurde basierend auf einem Tischaufbau des Systems bestehend aus einer Wärmebildkamera und einem LiDAR-Sensor auf mehreren öffentlichen Veranstaltungen präsentiert. Dabei wurden die Echtzeit-Objekterkennung und Sensordatenfusion vorgeführt. Diese Vorstellungen haben die gesellschaftliche Akzeptanz für das HDT unterstützt und die Vernetzung mit Akteuren aus der Wirtschaft und Wissenschaft gefördert.
 - Jubiläumsveranstaltung AIMotion 2. Jahr, Ingolstadt (11/2022)
 - Themenshow Autonomes Fahren, TUM Garching (12/2022)
 - Spatenstich Digitalbau, THI Ingolstadt (01/2023)
 - Eröffnung digitales Gründerzentrum, Ingolstadt (01/2023)
 - AI.BAY 2023, Deutsches Museum München (02/2023)
 - Klausurtagung Straßenbau, Landshut (05/2023)
 - IAA Mobility, München (09/2023)
 - BAI.CON, Ingolstadt (10/2023)
 - Audi Familientag, Ingolstadt (10/2023)
 - SafetyWeek, Hanau (05/2024)
 - On Campus Festival, Ingolstadt (06/2024)
 - Landesbaudirection, Ingolstadt (10/2024)
 - Jubiläumsveranstaltung AIMotion 4. Jahr, Ingolstadt (11/2024).
- **Auszeichnung mit dem Rotary Forschungspreis:** Im Jahr 2023 wurden die Forschungsgruppen THI, AININ und Fraunhofer mit dem Rotary Forschungspreis des Rotary Clubs Ingolstadt für ihre innovativen Arbeiten im Bereich der KI-gestützten Mobilitätsanwendungen im Rahmen des KIVI-Projekts und dessen HDT ausgezeichnet.
- **Annual Meeting des Transportation Research Board in Washington DC, 2022:** Präsentation und Austausch zur Anforderungsanalyse an die urbane Verkehrssteuerung (AP4)
- **InterTraffic Messe in Amsterdam, 2022:** Kontakte zu Testfeldausstattern (wie bspw. Liang-Dao) und Drohnenanbietern sowie Software-Dienstleistern / Unternehmen, die im Bereich der Verkehrssimulation (bspw. AIMSUN, PTV) oder Verkehrssteuerung (bspw. Yunex Traffic) tätig sind

- **Testfeldbesuch und Wissensaustausch in Singapur, 2022:** Austausch mit lokalen Experten zur Datenerhebung (AP 1) und Datenfusion (AP 3) aus stationären und dynamischen Sensoren in (Real-)Testfeldern wie unter anderem dem CETRAN-Testfeld von NTU, LTA und JTC in Singapur <https://cetran.sg/test-center/>.
- **International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), in Macau, China, 2022:** Präsentation und Austausch zum Thema KI in kooperativen intelligenten Verkehrssystemen bzw. Verbesserung des kooperativen Modelltrainings durch Systemoptimierung zwischen vernetzten Agenten in Verkehrssystemen
- **Vehicular Technology Conference (VTC), in Helsinki, Finnlands, 2022:** Präsentation und Austausch zum Thema kooperatives Multi-Objekt-Tracking mithilfe von Edge-Servern und Infrastruktur durch Late Fusion und standardisierte V2X-Nachrichtenformate
- **Symposium on Management of Future Motorway and Urban Traffic Systems in Dresden, 2022:** Präsentation und Austausch zum Multimodalen Performance Indikator (MPI)
- **Konferenz Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems in Nizza, 2023:** Präsentation und Austausch zum Multimodalen Performance Indikator (MPI)
- **Annual Meeting des Transportation Research Board in Washington DC, 2024:** Präsentation und Austausch zur KI-basierten Schätzung von Rückstaulängen an signalisierten Knotenpunkten
- **Konferenz für die User der Simulation of Urban Mobility (SUMO) in Berlin, 2024:** Präsentation und Diskussion zur automatisierten Konfliktpunktberechnung für die Kreuzungssteuerung von vollautomatisierten und vernetzten Fahrzeugen
- **InterTraffic Messe in Amsterdam, 2024:** Kontakte zu Herstellern von LSA-Hardware und Detektionseinrichtungen, sowie Software-Dienstleistern / Unternehmen, die im Bereich der Verkehrssimulation (bspw. PTV) oder Verkehrssteuerung und C-ITS (bspw. Yunex Traffic, Swarco, Stührenberg) tätig sind
- **C-ITS-Forum der ITS Mobility in Frankfurt/ Main, 2024:** Austausch zu Einbindung von C-ITS in die ÖPNV-Priorisierung
- **PTV-Anwenderseminar in Düsseldorf, 2024:** Präsentationen und Austausch zu Verkehrsfluss-simulation und Einbindung von C-ITS in die ÖPNV-Priorisierung
- **KIVI Abschlussevent in Ingolstadt, 2024:** Präsentation der Projektergebnisse je Projektpartner, Teilnahme mehrerer Vertreter von deutschen Städten, öffentlich zugänglich mit Voranmeldung