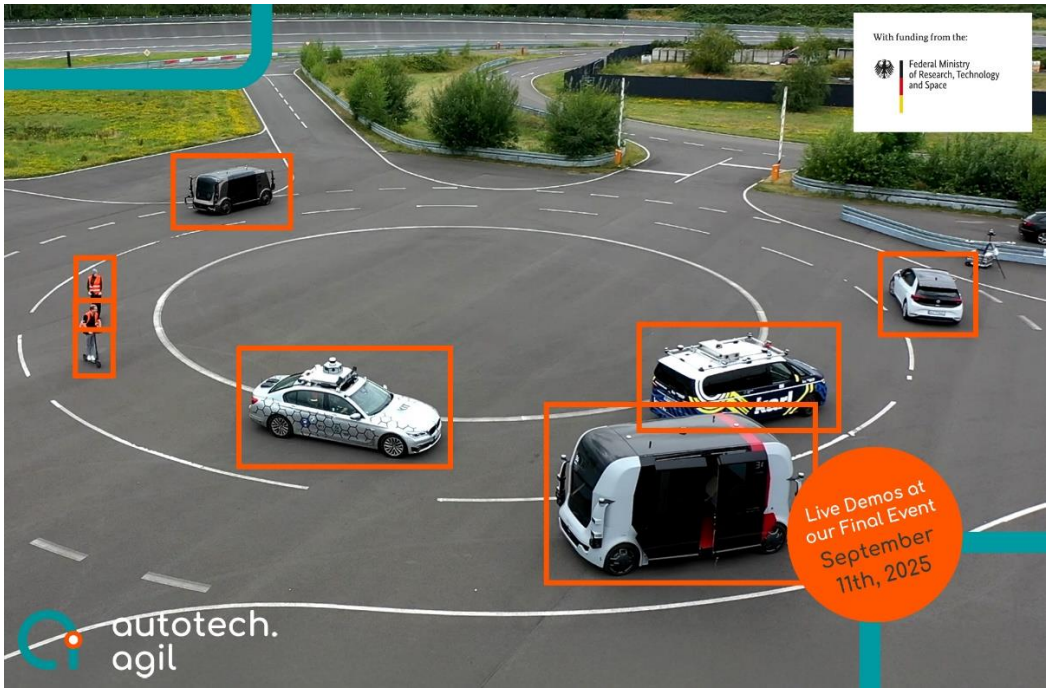
autotech.agil – Architektur und Technologien zur Orchestrierung automobiltechnischer Agilität

FKZ 16IS22088
„Elektronik und Softwareentwicklungsmethoden für die Digitalisierung der Automobilität (Mannheim)“
(BMFTR / BMBF)



Abschlussbericht
Teil I: Kurzbericht

Verbundkoordinator		
Institut für Kraftfahrzeuge (ika) – RWTH Aachen University		
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Lutz Eckstein		
Projektleiter des Verbundkoordinators		
Raphael van Kempen M.Sc.	Tel.:	+49 241 80 25599
Institut für Kraftfahrzeuge (ika) –	E-Mail:	raphael.vankempen@ika.rwth-aachen.de
RWTH Aachen University		
Laufzeit des Vorhabens	01.10.2022 bis 30.09.2025	
Berichtsdatum	31.10.2025	

***** Anlage 2 (zu Nr.4.1 NABF 2017 / NKBF 2017)

Disclaimer

Die in diesem Dokument geäußerten Ansichten liegen ausschließlich in der Verantwortung der Autoren und spiegeln nicht die Meinung des Fördergebers wider. Der Fördergeber ist nicht verantwortlich für die Verwendung der darin enthaltenen Informationen.

Copyright

© autotech.agil Konsortium 2025

Förderung

Gefördert durch: Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt	Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt unter dem Förderkennzeichen 16IS22088 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Projektpartner

An der Erstellung dieses Berichts waren die folgenden Konsortialpartner beteiligt:

FKZ	Partner
16IS22088A	RWTH Aachen University (RWTH)
16IS22088R	TU Braunschweig (TUBS)
16IS22088S	TU Darmstadt (TUDA)
16IS22088T	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
16IS22088U	TU München (TUM)
16IS22088V	Universität Stuttgart (UniS)
16IS22088W	Universität Ulm (UULM)
16IS22088X	Universität Passau (UniP)
16IS22088Y	FAU Erlangen-Nürnberg (FAU)
16IS22088B	iMAR Navigation GmbH (iMAR)
16IS22088Z	INCYDE industrial cyber defense GmbH (INCYDE)
16IS22088E	Thinking Cars GmbH (TC)
16IS22088F	DSA Daten- und Systemtechnik GmbH (DSA)
16IS22088J	IPG Automotive GmbH (IPG)
16IS22088K	Mercedes Benz AG (MBC)
16IS22088L	Robert Bosch GmbH (Bosch)
16IS22088M	Valeo Schalter und Sensoren GmbH (Valeo)
16IS22088N	Vector Informatik GmbH (VI)
16IS22088O	Hexagon Manufacturing Intelligence Germany GmbH [ehemals Vires Simulationstechnologie GmbH] (VIR-HEX)
16IS22088P	Vitesco Technologies GmbH (VT)
16IS22088Q	ZF Friedrichshafen AG (ZF)



Abbildung 1: Das Projektkonsortium bei der Abschlussveranstaltung am 11. September 2025

1 Stand der Technik und Aufgabenstellung

Die automobile Software- und Elektronikentwicklung war und ist stark hersteller- und anwendungsspezifisch geprägt. E/E-Architekturen umfassen viele spezialisierte und oft proprietäre Steuergeräte mit heterogenen, wenig standardisierten Schnittstellen. Dies erschwert Entwurf, Integration, Diagnose sowie die Update- und Upgradefähigkeit und verursacht hohe Entwicklungs- und Integrationskosten. IT-Konzepte wie Over-the-Air-Updates, Abstraktion von Hard- und Software sowie zusätzliche Rechen- und Speicherreserven wurden zwar zunehmend übernommen, blieben jedoch meist ebenfalls proprietär.

Diensteorientierte Architekturen (service-oriented architectures - SOA) gewannen in den letzten Jahren an Bedeutung. Mit der aus UNICAR*agil* hervorgegangenen Automotive Service-Oriented Software Architecture (ASOA) lag eine zur Laufzeit update- und upgradefähige, sicherheitsorientierte Architektur vor, lauffähig auf geschichteten, heterogenen E/E-Architekturen und bewusst kompatibel zu ROS 2. Parallel entwickelte sich AUTOSAR in Richtung AUTOSAR Adaptive; beide Ökosysteme nutzten DDS/RTPS als Kommunikationsmittel und boten damit Grundlagen für Interoperabilität. Auf der Netzebene zeichneten sich Automotive Ethernet und Time-Sensitive Networking (TSN) als Schlüssel zu deterministischer, echtzeitfähiger Kommunikation ab. Dennoch fehlte eine umfassende, systematische Einbindung externer Ressourcen (Cloud, RSU, Leitwarte) samt dynamischer Orchestrierung, die Diagnose blieb überwiegend steuergerätezentriert, die Schnittstellenversionierung war kaum etabliert und eine einheitliche, plattformübergreifende Betrachtung des Zeitverhaltens über AUTOSAR Classic und Adaptive hinweg war nicht gegeben.

In Forschung und Praxis existierten erste Ansätze zu dezentralem, verteiltem Rechnen sowie zu Fail-operational-Architekturen und dynamischer Reallokation, jedoch meist begrenzt auf nicht-sicherheitskritische Funktionen. Werkzeuge zur E/E-Optimierung berücksichtigen Hardware-Software-Co-Design, funktionale Sicherheit und die Anforderungen diensteorientierter Funktionsarchitekturen nur unzureichend. In der Perzeption dominieren resourcenintensive Deep-Learning-Ansätze. Hier versprachen neuromorphe Verfahren (Spiking Neural Networks auf dedizierter Hardware) deutliche Effizienzgewinne, waren aber kaum fahrzeug- oder infrastrukturseitig integriert. Digitale Zwillinge und kollektive Umgebungsmodelle aus Infrastruktursensorik (RSUs) sind punktuell verfügbar, jedoch ohne übergeordnete städtische Leitzentrale mit standardisierten Schnittstellen und ohne durchgängige Qualitätsbewertung (z. B. Qualitätsvektor) bis in Edge- und Cloud-Dienste. Themen wie modulare Absicherung, KI-Absicherung und die saubere Kopplung von Safety und Security in updatefähigen Systemen waren vor Projektbeginn nur teilweise adressiert.

Das Vorhaben autotech.agil verfolgte das Ziel, den diensteorientierten Ansatz zu einer holistischen, sicherheitsqualifizierten Architektur zu erweitern, die Fahrzeuge verschiedenster Klassen, Verkehrsinfrastruktur, Backend und Leitwarten bis hin zu einer städtischen Leitzentrale integriert. Hierzu wurden die folgenden **Schwerpunkte** bearbeitet**:**

- E/E-Architektur und hardwarenahe Software: Das SOA-Paradigma wurde in eine Entwicklungsplattform für zonale E/E-Architekturen überführt. Zentrales Element war die Spezifikation eines universellen, skalierbaren und Plug&Play-fähigen Universal Automotive Bus (UAB) als verbindende Schnittstelle. Darauf aufbauend wurden Mechanismen für echtzeitfähiges, verteiltes Rechnen auf Zonensteuergeräten entwickelt, einschließlich der Möglichkeit, Softwareapplikationen zur Laufzeit zu laden und auszutauschen sowie ungenutzte Rechenressourcen bereitzustellen. Zur Steigerung der Resilienz wurden Prädiktionsverfahren für Fehlerzustände und die unterbrechungsfreie Reallokation, auch für sicherheitskritische Funktionen, untersucht. Ergänzend entstanden Softwaretools für das Hardware-Software-Co-Design und die Optimierung von E/E-Architekturen unter Berücksichtigung funktionaler Sicherheit und ASOA-Anforderungen. Als Demonstratoren wurden u. a. prädiktiv regelbare Leistungselektronik (inkl. digitalem Zwilling) und neuromorphe Perzeption prototypisch umgesetzt und integriert.
- Diensteorientierte Softwarearchitektur: Die ASOA wurde über die Fahrzeuggrenze hinaus erweitert und um einen Qualitätsvektor ergänzt, der die robuste Orchestrierung funktionaler Wirkketten ermöglicht. Entwickelt wurden Verfahren zur dynamischen Orchestrierung von Ressourcen und Funktionen im Verbund aus Fahrzeug, Edge und Cloud, dienstorientierte Diagnose angelehnt an SOVD mit Einbindung eines Diagnosezwillings, eine Schnittstellenversionierung zur updatefähigen Evolution von Diensten sowie ein Qualifizierungsframework, um Dienste vergleichbar zu testen und zu bewerten. Es wurden neue Methoden zur Bewältigung der Herausforderungen beim Entwurf deterministischer Software für sicherheitskritische Systeme entwickelt. Anhand des industriellen Use Cases „Recuperation Balancing" wurde mithilfe von System-Level Logical Execution Time (SL-LET) sowie am Beispiel AUTOSAR Adaptive/Classic gezeigt wie sich die Vorteile von agiler Programmierung und serviceorientierten Architekturen (SOA) in Kopplung mit signalbasierten Systemen nutzen lassen. Eine prototypische Plattform diente der Evaluierung und dem Transfer in die Standardisierung.
- Funktionale Software zur Fahrzeugautomatisierung: Es wurden robuste, selbstbewertende Lokalisierungsverfahren mit Redundanz und offenen Schnittstellen zur Regelung erforscht, eine selbstbewertende Sensorfusion und situationsabhängige Umgebungswahrnehmung zur Ressourcenoptimierung erarbeitet sowie die Robustheit der Perzeption unter widrigen Bedingungen adressiert. Der fähigkeitsbasierte Ansatz wurde auf Trajektorienplanung und Regelung ausgedehnt. Die in UNICAR*agil* etablierte Sicherheitsfunktion „Sicheres Anhalten" wurde zu einer generalisierten Niedriggeschwindigkeitsfunktion (z. B. Valet-Parken, Laden, Waschen) weiterentwickelt. Grundlage für die Selbstbewertung war der in der Softwarearchitektur eingeführte Qualitätsvektor.
- Lernende vernetzte Verkehrsintelligenz: Es wurde ein hierarchisches Gesamtkonzept aus anbieterspezifischen Leitwarten und einer städtischen Leitzentrale konzipiert, welche einen digitalen Zwilling des Verkehrs sowie ein kollektives Verkehrsgedächtnis bereitstellt. Neuromorphe Datenverarbeitung in RSUs, die Integration von Luft- („Info-Biene") und bodengebundenen Sensorträgern sowie eine „Schutzengel"-Funktion für VRUs und Leichtfahrzeuge wurden prototypisch betrachtet. Dafür wurden V2X-Nachrichtenformate im Konsortium gemeinschaftlich weiterentwickelt und erlauben nicht nur die Informationsfusion und Bereitstellung in einem digitalen Zwilling, sondern auch eine effiziente Koordination und Unterstützung von automatisierten Fahrzeugen in Ausnahmesituationen.
- Durchgängiges Sicherheits- und Security-Konzept: Es wurde eine enge Kopplung von Top-down- und Bottom-up-Entwicklung etabliert, ein Monitoring-Framework entwickelt und eine modulare Absicherung über Qualitätsvektoren bis hin zu KI-Modulen mit Blick auf eine durchgängige Homologation erforscht. Zur Cyber-Resilienz wurde eine adaptierbare „Security-Schale" mit PKI-basierten Mechanismen konzipiert, einschließlich abgestufter Reaktionsstrategien auf Anomalien und Angriffe, ohne Safety zu kompromittieren.

- Use Cases und Proof of Concept: Die Praxistauglichkeit wurde anhand eines inklusiven autoSHUTTLE mit Cabin Manager für barrierefreie Interaktion sowie einer urbanen Logistikkette mit autoCARGO und Lieferrobotern demonstriert. Zusammen mit dem Fahrzeug autoELF wurden somit unterschiedliche Anwendungsfälle gezeigt und dabei erfolgreich die in UNICAR*agil* entstandene Forschungsinfrastruktur wiederverwendet. Darüber hinaus wurde die Orchestrierung von Diensten über Fahrzeug- und Infrastrukturgrenzen hinweg erforscht. Die Vernetzung der Teilsysteme wurde im digitalen Zwilling sowie zur kooperativen Trajektorienplanung, der effizienten Teleoperation und der robusten Lokalisierung anschaulich demonstriert.

2 Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben autotech.agil durchlief vier aufeinander aufbauende Phasen von der gemeinsamen Anforderungsdefinition über die projektweite Konzeptionsreife und die Umsetzung erster Prototypen bis zur finalen, integrativen Demonstration.

Bis Monat 9 stand die Anforderungsdefinition im Mittelpunkt. Nach dem internen Kick-off wurden Koordinations-, Kommunikations- und Projektmanagement-Strukturen etabliert (AP 0), gemeinsam User Stories erarbeitet (AP 1) und die Synchronisation aller Haupt-Arbeitspakete angestoßen. Technisch wurde die aus UNICAR*agil* stammende ASOA als Ausgangsbasis vorgestellt und auf die Ziele von autotech.agil abgebildet (AP 3). Funktionen und Algorithmen aus UNICAR*agil* wurden übernommen und als Fundament für die Weiterentwicklung konsolidiert (AP 4), während der Stand der Technik für Absicherung und Safety-by-Design systematisch aufgearbeitet und ein holistischer Sicherheitsansatz vorbereitet wurde (AP 6). Parallel wurden Schnittstellen zwischen den beteiligten Komponenten konkretisiert (AP 2-5, 7) und Anforderungen aus Nutzendensicht in gemeinsamen Workshops erarbeitet (AP 7). Die internationale Publikations- und Öffentlichkeitsarbeit (u. a. Beiträge bei IEEE IV und ITSC) erhöhte die Sichtbarkeit des Projekts. Abweichungen im Personalaufbau, der Harmonisierungsprozess der Kooperationsvereinbarung und erhöhter Aufwand im Berichtswesen banden zeitweise Kapazitäten, gefährdeten das Gesamtziel jedoch nicht.

Bis Monat 18 wurde die projektweite Konzeption abgeschlossen. Nachdem Personallücken weitgehend geschlossen worden waren, entwickelte das Konsortium ein gemeinsames Zielbild und leitete daraus klare Anforderungen pro Arbeitspaket ab (AP 1-7). Zentrale Grundlagen wurden harmonisiert: Schnittstellen, Datenformate und die Kommunikationsarchitektur wurden partnerübergreifend abgestimmt, und der Qualitätsvektor wurde in eine Referenzarchitektur überführt (AP 3). Ein gemeinsamer Werkzeug-Baukasten für die Softwareentwicklung wurde aufgebaut, um die verteilte Umsetzung zu beschleunigen. Gleichzeitig startete die Ausarbeitung der Sicherheitsargumentation und der ganzheitlichen Absicherung (AP 6) sowie die konzeptionelle Vorbereitung einer serviceorientierten Diagnose und Updatefähigkeit in Richtung SOVD (AP 3). Erste prototypische Verifikationen liefen in ausgewählten Teilbereichen bereits an (AP 2-5), die Konzeptionsphase als Ganzes galt im Konsortium als abgeschlossen.

Bis Monat 27 standen die Umsetzung erster Prototypen und die Vorbereitung der Integration im Vordergrund. Der Übergang von der prototypischen zur anwendungsnahen Implementierung gelang in allen Haupt-APs (AP 2-5). Funktionsfähige Demonstratoren wurden realisiert, darunter Event-Kameras und Diagnose-Services sowie Apps für die inklusive Personenmobilität zur digitalen Barrierefreiheit und den Guardian Angel zur Anbindung verletzlicher Verkehrsteilnehmender an den digitalen Zwilling (AP 5/7). Auf der Halbzeitveranstaltung im Rahmen des VDI-Kongresses ELIV wurden 2024 Zwischenergebnisse öffentlich präsentiert. Im Hintergrund erfolgte die enge Abstimmung für integrative Demonstrationen, die die Kernbausteine des Gesamtsystems übergreifend zusammenführten. Partnerübergreifende Veröffentlichungen und Open-Source-Beiträge erhöhten Reichweite und Anschlussfähigkeit, während Beiträge zur Sicherheitsargumentation in Workshops konsolidiert wurden (AP 6).

Bis Monat 36 rückten die Endintegration und das Zusammenspiel aller Entwicklungen in den Fokus. Bei mehreren Plug-Tests am Aldenhoven Testing Center wurden Fahrzeuge und Entwicklungen mehrerer Partner erfolgreich in einem gemeinsamen digitalen Zwilling betrieben, womit die Systemintegration über Fahrzeug- und Infrastrukturgrenzen hinweg praktisch nachgewiesen wurde (AP 5/7). Parallel reiften die technischen Bausteine weiter: Die UAB-Schnittstelle wurde durch Adapterplatinen und Tischdemonstratoren verifiziert (AP 2), unterbrechungsfreie Dienst-Reallokationen liefen im ECU-Verbund, und Optimierungsalgorithmen für E/E-Architekturen samt Routing- und Zeitplanmechanismen erhöhten die Ressourceneffizienz (AP 2/3). Das Orchestrierungskonzept erlaubte Rekonfigurationen bei Degradation; ein TSN-basierter Demonstrator mit V2X- und Edge-Anbindung sicherte den Echtzeitbetrieb, während ein Diagnosedienst Laufzeitdaten SOVD-konform für Monitoring und Predictive Maintenance komprimierte (AP 3). Die Sensor- und Lokalisierungskette aus IMU, GNSS, Lidar und Kameras wurde final in Betrieb genommen; skalierbare Lidar-Detektion und adaptive Fusion erlaubten eine robustere Umgebungserkennung, selbstbewertete Offline-Methoden schlossen GNSS-Lücken und gewährleisteten robuste Positionierung (AP 4). Das Low-Speed-

Automatisierungsmodul eines Leichtfahrzeugs (z. B. autoELF) mit Trajektorienplanung und kaskadierter Regelung wurde in ein ROS-2/ASOA-Framework integriert (AP 4/7). Kollektive Funktionen demonstrierten verteilte Verhaltensentscheidungen, situativ auf Infrastrukturrechner auslagerbare Services (z.B. Trajektorienplanung) und Teleoperation. Hybride Lagebilder aus Fahrzeug- und Drohnendaten wurden mit Visualisierungstools anschaulich dargestellt (AP 5/7). Flankierend entstand ein durchgängiges Sicherheits- und Testframework mit gemeinsamer Terminologie, Risikoanalyse, cloudbasierter Szenariodatenbank, formalen Testspezifikationen, Simulationslösungen, OOD-Erkennung und erklärbarer Perzeptionsfehleranalyse sowie einer Automotive-PKI und Intrusion Detection (AP 6). Die Use Cases „Wellbeing“, „Machine Hearing“, „Last-Mile Logistics“ und „Guardian Angel“ wurden in Tisch- und Fahrzeugdemonstratoren erprobt, inklusive Kopplung von autoCARGO und Lieferroboter, Live-Anbindung an den digitalen Zwilling und strategischer Betriebsoptimierung (AP 7). Verbleibende Optimierungen in den Kommunikationsketten und letzte Subsystem-Abstimmungen wurden rechtzeitig vor der Abschlussveranstaltung abgeschlossen. Damit lagen alle Kernfunktionen – von serviceorientierter Architektur über resiliente Automatisierung bis zur durchgängig abgesicherten Cloud-/Edge-Integration – demonstrationsreif vor.

3 Wesentliche Ergebnisse

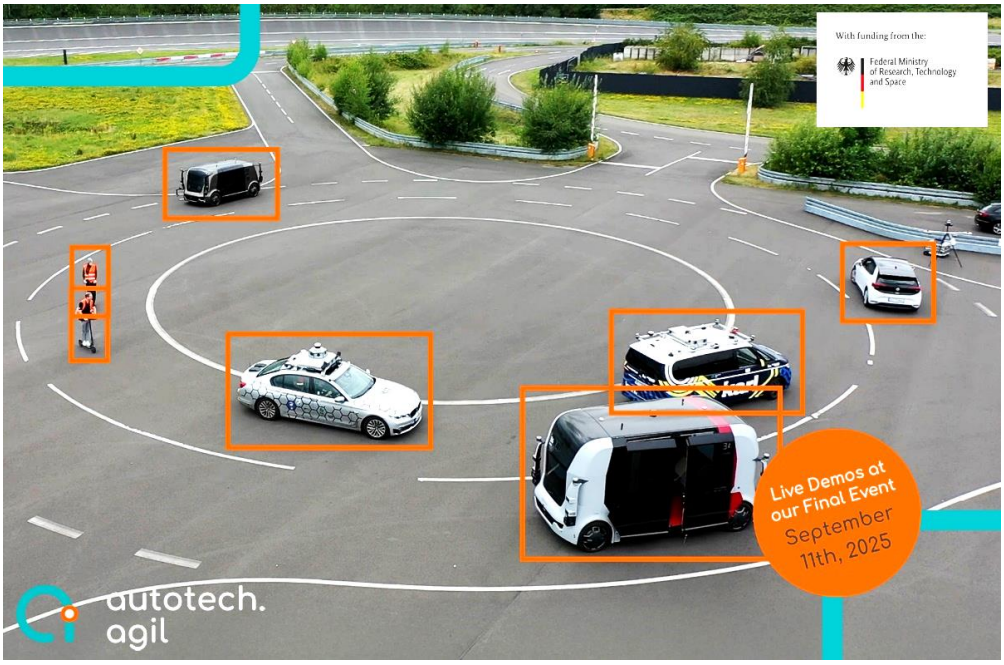
Auf der Abschlussveranstaltung am 11. September 2025 auf dem Aldenhoven Testing Center wurde ein vernetztes, automatisiertes Mobilitätssystem als Reallabor präsentiert, in dem autonome (Forschungs-)Fahrzeuge, intelligente Infrastruktur, eine cloudbasierte Leitzentrale und Clouddienste nahtlos zusammenwirkten und an zwölf Stationen live erlebbar waren, inklusive Mitfahrgelegenheiten in über zehn vernetzten Fahrzeugen. Im Zentrum stand ein digitaler Zwilling des Verkehrs, der Informationen in Echtzeit bündelte, auf dessen Basis durch eine Leitzentrale Straßen gesperrt, Verkehr umgeleitet und so eine koordinierte Notfallreaktion über das gesamte Verkehrssystem hinweg demonstriert werden konnte. Dieser digitale Zwilling speiste sich aus Fahrzeug-, Infrastruktur- und Leitzentraldaten und zeigte das Potenzial vorausschauender Steuerung für mehr Sicherheit und Effizienz im Betrieb.

Die Fahrzeugdemonstratoren verdeutlichten wesentliche Projektinnovationen: Das autoSHUTTLE zeigte inklusiven ÖPNV mit barrierefreier Informations- und Kommunikationsschnittstelle, Komfortfunktionen gegen Reiseübelkeit und Notruferkennung. Die autoELF demonstrierte, wie eine sorgfältig ausgewählte Sensorik selbst kleinste Verkehrsteilnehmende im dichten Stadtverkehr zuverlässig erkennt. Mit dem autoCARGO wurde eine flexible Paketzustellung erprobt, bei der Fahrzeug und mobiler Roboter unabhängig von festen Stationen Pakete übergeben. Zwei automatisierte Forschungsfahrzeuge demonstrierten die diensteorientierte Auslagerung der Trajektorienplanung und die gelernte Verhaltensentscheidung, während mit einem weiteren automatisierten Versuchsträger die verteilte teleoperierte Verhaltensentscheidung zwischen Fahrzeug und Leitwarte demonstriert wurde. Dazu kamen Fahrdemos zur robusten Positionierung durch die Kombination von GNSS, LiDAR und Kameras sowie zum Eco-Routing und Eco-Speed für nachhaltige und bauteilschonende Fahrweisen auf Basis der Informationen aus dem digitalen Zwilling. Für die Sicherheit schwächerer Verkehrsteilnehmender wurde ein digitaler „Schutzengel“ demonstriert, der Gefahren wie ausparkende Fahrzeuge in Echtzeit aufs Smartphone meldet, abgesichert durch ein durchgängiges Cybersicherheitskonzept von der Fahrzeugkommunikation bis zur Cloud.

Als Herzstück koordinierte die cloudbasierte Leitzentrale Notfälle und alltägliche Verkehrsflüsse in Echtzeit und vereinte erstmals Sensordaten aus Ulm, München und Aachen in einem gemeinsamen digitalen Zwilling, wodurch ein städteübergreifendes Echtzeit-Abbild des Verkehrsnetzes entstand. Mit einer offenen, modularen Systemarchitektur wurden Forschungsergebnisse und Industrieanforderungen zu einem prototypischen Gesamtsystem verknüpft, das sogar vernetzte Serienfahrzeuge integrieren kann. Die konsequente Nutzung standardisierter Schnittstellen und Open-Source-Ergebnisse unterstützt digitale Souveränität, beschleunigt die Übertragung in Folgeprojekte und ermöglicht die Umsetzung des digitalen Verkehrszwillings in Modellregionen und ambitionierten Städten. Insgesamt zeigten die Demonstrationen, wie Automatisierung und Vernetzung Mobilität sicherer, inklusiver und effizienter machen und als Blaupause für künftige, großflächig vernetzte Mobilitätssysteme dienen können.

autotech.agil – Architektur und Technologien zur Orchestrierung automobiltechnischer Agilität

FKZ 16IS22088
„Elektronik und Softwareentwicklungsmethoden für die Digitalisierung der Automobilität (Mannheim)“
(BMFTR / BMBF)



Abschlussbericht
Teil II: Eingehende Darstellung

Verbundkoordinator		
Institut für Kraftfahrzeuge (ika) – RWTH Aachen University		
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Lutz Eckstein		
Projektleiter des Verbundkoordinators		
Raphael van Kempen M.Sc.	Tel.:	+49 241 80 25599
Institut für Kraftfahrzeuge (ika) –	E-Mail:	raphael.vankempen@ika.rwth-aachen.de
RWTH Aachen University		
Laufzeit des Vorhabens	01.10.2022 bis 30.09.2025	
Berichtsdatum	31.10.2025	

***** Anlage 2 (zu Nr.4.1 NABF 2017 / NKBF 2017)

Disclaimer

Die in diesem Dokument zum Ausdruck gebrachten Meinungen geben nur die Meinung der Autoren wieder und spiegeln in keiner Weise die Meinung des Fördergebers wider. Der Fördergeber ist nicht verantwortlich für die Verwendung der darin enthaltenen Informationen.

Copyright

© autotech.agil Konsortium 2025

Förderung

Gefördert durch: Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt	Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt unter dem Förderkennzeichen 16IS22088 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Projektpartner

An der Erstellung dieses Berichts waren die folgenden Konsortialpartner beteiligt:



Abbildung 1: Das Projektkonsortium *bei der Abschlussveranstaltung am 11. September 2025*

FKZ	Partner	Autoren
16IS22088A	RWTH Aachen University (RWTH)	Institut für Kraftfahrzeuge (ika) Raphael van Kempen Christian Geller Kathrin Hülsen Marc Leuffen Bastian Lampe Jean-Pierre Busch Lena Wirtz Fabian Thomsen Mario Winter Ida Feger Lehrstuhl für Informatik 11 – Embedded Software Julius Kahle David Klüner Lucas Hegerath Marius Molz Lehrstuhl und Institut für Flugsystemdynamik (FSD) Max Hartmann Lehrstuhl für Software Engineering (SE) Felix Steinfurth Sebastian Will
16IS22088R	TU Braunschweig (TUBS)	Institut für Regelungstechnik (IFR) Niklas Braun Richard Schubert Institut für Datentechnik und Kommunikationsnetze (IDA) Sebastian Abel
16IS22088S	TU Darmstadt (TUDA)	Fachgebiet Fahrzeugtechnik (FZD) Lorenz Bayerlein Moritz Berghöfer Alexander Blödel Anton Kuznietsov Fachgebiet Physikalische Geodäsie und Satellitengeodäsie (PSGD) Jakob Bahle Dr.-Ing. Stefan Leinen
16IS22088T	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	Institut für Mess- und Regelungstechnik (MRT) Dr. Martin Lauer Nick Le Large Dr.-Ing. Jan-Hendrik Pauls Willi Poh Nils Rack Marlon Steiner Kaiwen Wang Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) Gideon Arndt Benedikt Schulz
16IS22088U	TU München (TUM)	Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik (FTM) Gemb Kaljavesi David Brecht Florian Pfab

		Dr.-Ing. Frank Diermeyer Lehrstuhl für Robotik, Künstliche Intelligenz und Echtzeitsysteme (AIR) Xingcheng Zhou Jiajie Zhang
16IS22088V	Universität Stuttgart (UniS)	Institut für Fahrzeugtechnik (IFS) Dr.-Ing. Dan Greiner Institut für Robuste Leistungshalbleitersysteme (ILH) Prof. Dr.-Ing. Ingmar Kallfass Dr. Oleksandr Solomakha Valentyna Afanasenko Chris Hermann Swapnil Sunil Roge
16IS22088W	Universität Ulm (UULM)	Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik (MRM) Prof. Dr.-Ing. Michael Buchholz Robin Dehler Vladimir Lunic
16IS22088X	Universität Passau (UniP)	Lehrstuhl für Technische Informatik (TI) Prof. Dr. Stefan Katzenbeisser Dr. Dominik Püllen
16IS22088Y	FAU Erlangen-Nürnberg (FAU)	Lehrstuhl für Regelungstechnik (LRT) Lars Ullrich Prof. Dr.-Ing. Knut Graichen
16IS22088B	iMAR Navigation GmbH (iMAR)	Lukas Jung
16IS22088Z	INCYDE industrial cyber defense GmbH (INCYDE)	Dr.-Ing. Daniel Zelle
16IS22088E	Thinking Cars GmbH (TC)	Dr.-Ing. Timo Woopen
16IS22088F	DSA Daten- und Systemtechnik GmbH (DSA)	Dr. Boris Böhlen Claudia Hannig
16IS22088J	IPG Automotive GmbH (IPG)	Viktor Lizenberg
16IS22088K	Mercedes Benz AG (MBC)	Philip Mayer
16IS22088L	Robert Bosch GmbH (Bosch)	Felix Berkel
16IS22088M	Valeo Schalter und Sensoren GmbH (Valeo)	Dr. Heinrich Gotzig
16IS22088N	Vector Informatik GmbH (VI)	Dr. Kai-Björn Gemlau
16IS22088O	Hexagon Manufacturing Intelligence Germany GmbH [ehemals Vires Simulationstechnologie GmbH] (VIR-HEX)	Esther Hekele
16IS22088P	Vitesco Technologies GmbH (VT)	Ralph Mader Dr. Martin Alfranseder
16IS22088Q	ZF Friedrichshafen AG (ZF)	Thomas Schulik Dr. Martin Lilienthal

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung 5
2 Wissenschaftliche Ergebnisse 6
2.0 Haupt-AP 0: Projektkoordination 6
2.1 Haupt-AP 1: Gesamtarchitektur, Gesamtsystemintegration und Demonstration 7
2.2 Haupt-AP 2: Diensteorientierte hardwarenahe Software 9
2.2.1 AP 2.1: Entwicklungsplattform für diensteorientierte E/E-Zonenarchitekturen 9
2.2.2 AP 2.2: Diensteorientierte prädiktiv regelbare Leistungselektronik 10
2.2.3 AP 2.3: Hochintegrierte, neuromorphe, diensteorientierte P. 12
2.3 Haupt-AP 3: Sicherheitsqualifizierte diensteorientierte Softwarearchitektur 14
2.3.1 AP 3.1: Skalierbare diensteorientierte Softwarearchitektur 14
2.3.2 AP 3.2: Diensteorientierte Diagnose 15
2.3.3 AP 3.3: Integration in industrielle Plattformen und Methoden 18
2.3.4 AP 3.4: Werkzeuge zur diensteorientierten Softwareentwicklung 21
2.4 Haupt-AP 4: Funktionale Software zur Fahrzeugautomatisierung 24
2.4.1 AP 4.1: Robuste, integere und selbstbewertende Lokalisierung im urbanen Umfeld 24
2.4.2 AP 4.2: Selbstbewertende und situationsabhängige Umgebungswahrnehmung 26
2.4.3 AP 4.3: Robuste Planung und Regelung durch probabilistische Verfahren 27
2.4.4 AP 4.4: Methoden für automatisierte Niedriggeschwindigkeitsfunktionen 30
2.5 Haupt-AP 5: Lernende vernetzte Verkehrsintelligenz 32
2.5.1 AP 5.1: Leitzentrale zur sicheren Koordination von Leitwartenverbünden 32
2.5.2 AP 5.2: Digitaler Zwilling & Kollektive Funktionalitäten 33
2.5.3 AP 5.3: Verteilte Verhaltensentscheidung 36
2.6 Haupt-AP 6: Durchgängiges Sicherheitskonzept & Algorithmen 40
2.6.1 AP 6.1: Durchgängige Sicherheitsbetrachtung 40
2.6.2 AP 6.2: Homologationsprozesse & Methoden zur modularen Absicherung 41
2.6.3 AP 6.3: Cyber Security für vernetzte intelligente Verkehrssysteme 44
2.6.4 AP 6.4: Gesamtheitliche Selbstwahrnehmung über ein Monitoring-Framework 46
2.7 Haupt-AP 7: Use Cases & Proof of Concept 47
2.7.1 AP 7.1: Inklusive Personenmobilität 47
2.7.2 AP 7.2: Effizienter Warentransport 49
2.7.3 AP 7.3: Aktive Sicherheit für VRU und Leichtfahrzeuge 50
3 Eingesetzte Ressourcen und Angemessenheit der Projektarbeiten 51
4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Projektergebnisse 58
5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 64
6 Anhang 69
6.1 Öffentlichkeitsarbeit 69
Beiträge in der Presse 69
Projektpräsentation bei Veranstaltungen 71
Wissenschaftliche Veröffentlichungen (Konferenz- und Journalbeiträge) 73

1 Zusammenfassung

Im Kooperationsprojekt autotech.agil forschten 9 Universitäten und 12 Unternehmen gemeinsam an Methoden und Werkzeugen für zukünftige Mobilität. Das Projekt gliederte sich in 8 Haupt-Arbeitspakete mit insgesamt 23 Arbeitspaketen, in denen die operative Arbeit stattfand. Im Fokus standen dabei drei relevante Anwendungsfälle (AP 7), aus denen sich Anforderungen an vernetzte und automatisierte Mobilität ergaben. Die Grundlagen dafür wurde in den Haupt-APs 1 bis 6 geschaffen – von der Gesamtarchitektur (AP 1) über hardwarenahe Software (AP 2) und eine diensteorientierte Softwarearchitektur (AP 3) als Basis für die funktionale Software zur Fahrzeugautomatisierung (AP 4) sowie für eine lernende vernetzte Verkehrsintelligenz (AP 5) bis zu einem durchgängigen Sicherheitskonzept (AP 6). Dadurch wurde eine ganzheitliche Betrachtung der Herausforderungen zukünftiger Mobilität ermöglicht. Die Projektkoordination in AP 0 schuf die organisatorischen Strukturen für das Vorhaben.

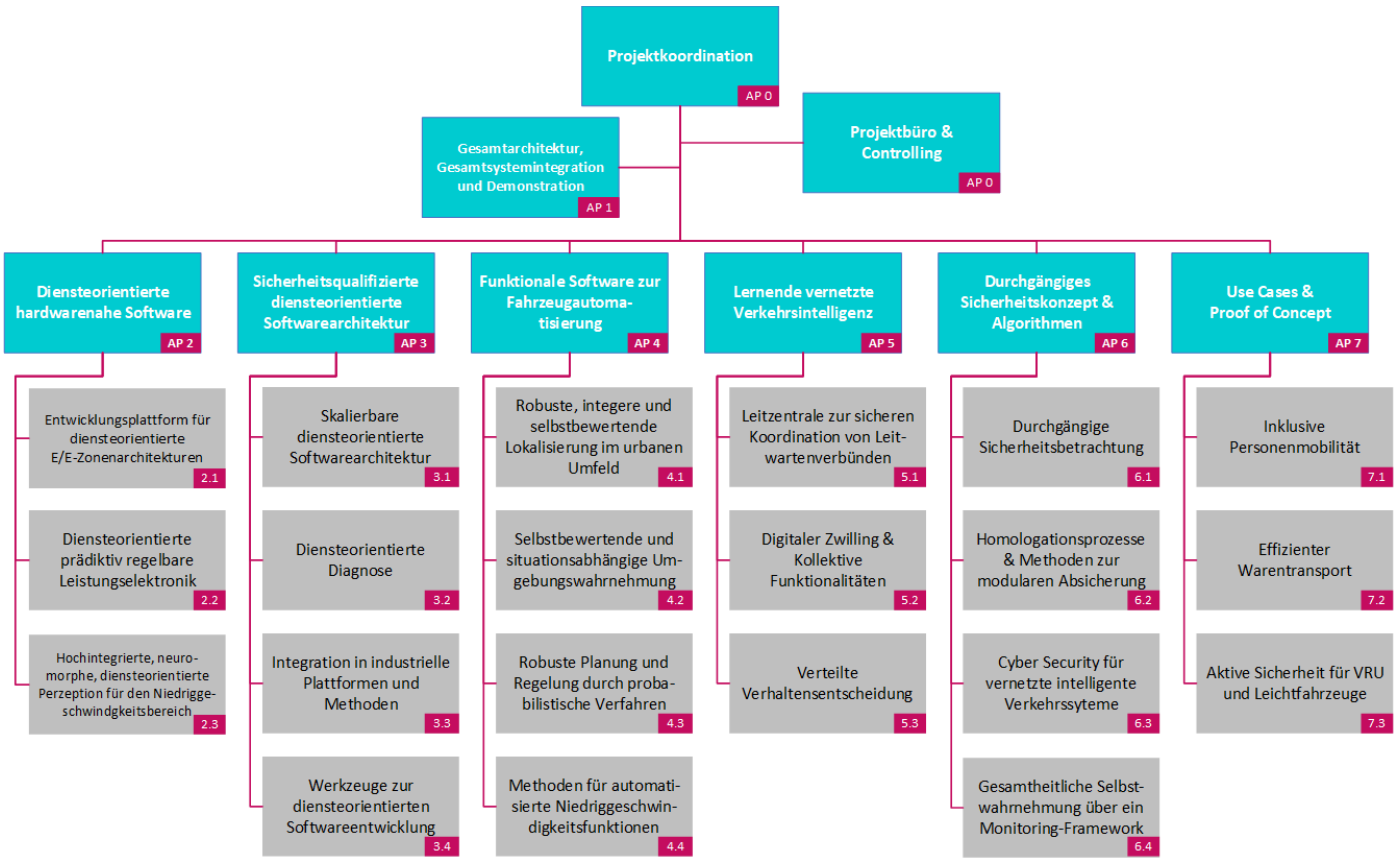


Abbildung 2: Das Projekt gliedert sich in insgesamt 23 Arbeitspakete, die 8 Haupt-Arbeitspaketen zugeordnet sind.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Arbeiten in Bezug zur Vorhabensbeschreibung beschrieben und die Verwendung der Zuwendung erläutert. Für eine übersichtliche Darstellung orientiert sich der Bericht an der in Abbildung 2 dargestellten Projektstruktur.

2 Wissenschaftliche Ergebnisse

2.0 Haupt-AP 0: Projektkoordination

Das Haupt-AP 0 umfasste die administrative und inhaltliche Projektkoordination des Gesamtvorhabens sowie die Einrichtung eines Projektbüros für Berichtswesen und Öffentlichkeitsarbeit sowie das Projektcontrolling.



Abbildung 3: Das Projektkonsortium auf einem von insgesamt elf Präsenz-Konsortialtreffen

Beiträge der beteiligten Projektpartner:

Das **Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen** übernahm als Verbundkoordinator auch die Leitung des Haupt-APs 0. Es stellte eine wissenschaftliche sowie administrative Projektleitung, die sowohl die inhaltliche Koordination auf Gesamtprojektebene sowie die Organisation von Projekttreffen und Teilnahmen an öffentlichen Veranstaltungen übernahm. Sie stand außerdem als Ansprechpartner für den Projektträger und den Fördergeber zur Verfügung. Das Projektbüro koordinierte das Berichtswesen sowie die Öffentlichkeitsarbeit.

Im Projektzeitraum wurden 13 Konsortialtreffen (davon 2 online) organisiert. Insbesondere der persönliche Austausch vor Ort hat entscheidend zum Projekterfolg beigetragen, da die Gesamtarchitektur und Schnittstellen so effizient abgestimmt werden konnten. In insgesamt 93 digitalen Projektmanagement-Meetings stand ein Kernteam aus Vertretern aller Projektpartner kontinuierlich im engen Austausch, wodurch die Präsenztreffen optimal vorbereitet werden konnten. In 15 Steuerkreis-Sitzungen wurden richtungsweisende Entscheidungen, insbesondere hinsichtlich der Gesamtarchitektur und der Demonstrationen getroffen.

Um sowohl die Fachcommunity als auch die interessierte Öffentlichkeit am Projektfortschritt teilhaben zu lassen wurde eine Projektwebseite unter www.autotechagil.de eingerichtet und laufend aktualisiert. Auch auf verschiedenen Social-Media-Kanälen, insbesondere auf LinkedIn (https://www.linkedin.com/company/92921487) und Instagram (https://www.instagram.com/autotech.agil) wurde der Projektfortschritt in etwa 50 Beiträgen anschaulich dargestellt, die ca. 60.000 Impressionen erzeugt haben.

Die wissenschaftlichen Projektergebnisse wurden auf zahlreichen Konferenzen und Fachtagungen präsentiert. Die vollständige Liste der über 80 wissenschaftlichen Veröffentlichungen ist im Anhang dieses Berichts zu finden.

2.1 Haupt-AP 1: Gesamtarchitektur, Gesamtsystemintegration und Demonstration

Das Haupt-AP 1 bildete die inhaltliche Grundlage für die Arbeiten in den weiteren Haupt-Arbeitspaketen. Hier wurde in engem Austausch zwischen den Projektpartnern eine Gesamtsystemarchitektur für ein vernetztes und automatisiertes Mobilitätssystem der Zukunft geschaffen. Basierend auf der in Abbildung 4 dargestellten Projektskizze wurden konkrete Teilmodule und Schnittstellen abgeleitet und auf diversen Konsortialtreffen zwischen den Projektpartnern diskutiert. Dadurch konnte ein einheitliches Gesamtsystemverständnis und Vokabular aufgebaut werden, was für die nachfolgende prototypische Implementierung des Gesamtsystems essenziell war. Basierend auf den Vorarbeiten aus dem Vorgängerprojekt UNICARagil, insbesondere der Architektur von Funktionen und Software, konnten erweiterte und neue Teilmodule geschaffen werden, die verschiedene Aspekte zukünftiger Mobilität abdeckten. Die Softwarearchitektur wurde erweitert um das Konzept eines Qualitätsvektors, der jederzeit ein sicheres Systemverhalten auch im Falle von Degradation ermöglicht. So entstanden basierend auf einer robusten und fehlertoleranten Softwarearchitekur verschiedene funktionale Module zur Realisierung unterschiedlicher exemplarischer Anwendungen (vgl. Haupt-AP 7). Das prototypische Gesamtsystem wurde im Rahmen der Abschlussveranstaltung am 11. September 2025 auf dem Aldenhoven Testing Center erfolgreich ca. 300 Besuchern aus Politik, Presse, Fachpublikum und der allgemeinen Öffentlichkeit präsentiert. Im Rahmen von 12 Live-Demonstrationen in verschiedenen automatisierten und konventionellen Fahrzeugen, unter anderem den vier UNICARagil-Fahrzeugen, konnten die Besucherinnen und Besucher erleben, wie Automatisierung und Vernetzung zukünftige Mobilität komfortabler, sicherer und effizienter gestalten können. Im Fokus standen dabei insbesondere herausfordernde Situationen im Straßenverkehr – wie beispielsweise ein Rettungseinsatz, Streckensperrungen oder blockierte Fahrbahnen – die durch das vernetzte Gesamtsystem sicher beherrscht werden konnten. Allen Demonstratoren gemein war die Vernetzung über einen cloudbasierten digitalen Zwilling, durch den alle Submodule in ein Gesamtsystem integriert werden konnten und eine sichere, koordinierte Reaktion des Verkehrssystems auf Herausforderungen ermöglicht wurde.

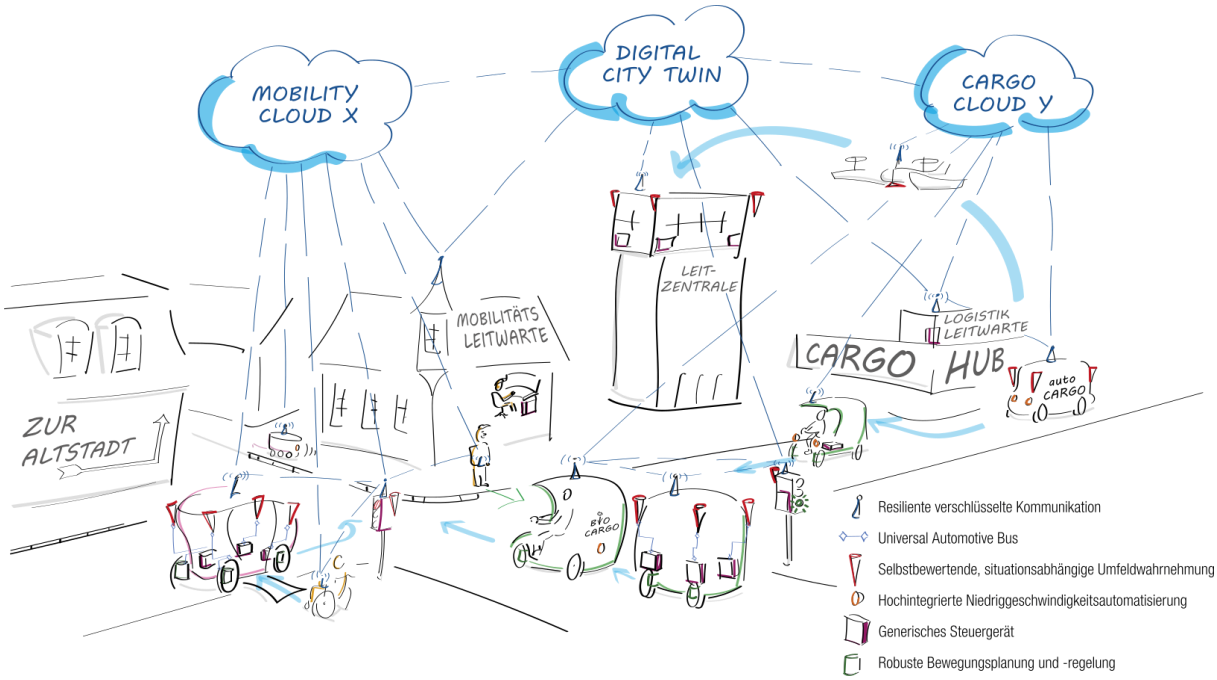


Abbildung 4: Die von Prof. Dr. Lutz Eckstein skizzierte Vision eines modularen zukünftigen Mobilitätssystems diente dem Konsortium als Zielbild für die inhaltliche Arbeit in autotech.agil.

Beiträge der beteiligten Projektpartner:

Das **Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen** übernahm die Leitung des Haupt-AP 1 und koordinierte die Abstimmung der Gesamtarchitektur und Schnittstellen. Es stellte eine Entwicklungsplattform und Software-Werkzeuge bereit, die eine partnerübergreifende Abstimmung der Architektur und Schnittstellen vereinfachten. Gemeinsam mit den Projektpartnern wurden Ideen für Use-Cases und Demonstrationen entwickelt, die verschiedene Aspekte des

Gesamtsystems fokussierten und verschiedene Projektpartner zusammenbrachten. Dies diente als Katalysator für die erfolgreiche Zusammenarbeit und stellte sicher, dass die von verschiedenen Partnern entwickelten Module letztendlich im Gesamtsystem zusammen funktionierten. Erste Zwischenergebnisse konnten auf der Halbzeitveranstaltung im Rahmen des VDI-Kongresses ELIV (Electronics in Vehicles) am 16.-17. Oktober 2024 in Bonn präsentiert und mit dem Fachpublikum diskutiert werden. Dort konnte bereits die Vernetzung zwischen einem automatisierten Shuttle und intelligenter Infrastruktursensorik über einen digitalen Zwilling demonstriert werden. Auf der Abschlussveranstaltung am 11. September 2025 auf dem Aldenhoven Testing Center konnte dann schlussendlich das prototypische Gesamtsystem mit 10 Fahrzeugen, intelligenter Infrastruktursensorik, einer Leitzentrale und Leitwarten, die alle über den digitalen Zwilling miteinander vernetzt waren, demonstriert werden.

Der **Lehrstuhl Informatik 11 der RWTH Aachen** stellte aktuelle Versionen der Automotive Service-oriented Software Architecture (ASOA) zur Nutzung im Konsortium bereit und half bei der Integration der Software in die Anwendungen verschiedener Partner des Konsortiums. Darüber hinaus erweiterte er das Feature-Set der ASOA in Hinblick auf die entwickelte Gesamtarchitektur hinsichtlich des Qualitätsvektors und der automatischen Reaktion auf Degradationszustände. Im Rahmen von Vorbereitungen der Halbzeitveranstaltung und der Abschlusspräsentation unterstützte er einige Partner bei der Integration ihrer Ergebnisse in die auf ASOA basierenden Demonstrationen. Der Lehrstuhl übernahm das Hosting des Architekturtools und dessen Pflege hinsichtlich Verlässlichkeit und Verfügbarkeit von API und Webinterface. Zur Weiterentwicklung des Architekturtools koordinierte er eine Anforderungsanalyse im gesamten Konsortium. Um den erweiterten Umfang dem Konsortium nahezulegen, bot er einen Workshop an, in dem der Workflow zur Eintragung in das Tool erklärt wurde. Zusätzlich übernahm der Lehrstuhl die Migration der Architekturdaten der in UNICARagil entwickelten Fahrzeuge in die neue Version des Tools.

Die **Thinking Cars GmbH** verantwortete in Haupt-AP 1 die Instandhaltung und den Weiterbetrieb der aus dem Vorgängerprojekt UNICARagil übernommenen Fahrzeugprototypen. Dafür wurde eine umfangreiche Fahrzeugdokumentation angelegt und dem Konsortium zur Verfügung gestellt. Diese stellte die Basis für die Erweiterung des Funktionsumfangs bspw. für die autoELF (durch die TU Darmstadt) und das autoSHUTTLE (durch die RWTH Aachen) dar und wurde ebenfalls als Dokumentation für entstandene Herausforderungen und deren Lösungen verwendet. Die TC unterstützte außerdem bei der Planung und Durchführung aller Veranstaltungen, auf denen die Fahrzeuge eingesetzt wurden (s.o.).

Alle Projektpartner wirkten bei der Erarbeitung der Gesamtarchitektur sowie der Definition von Schnittstellen zwischen den Teilmodulen mit. Eine hohe Teilnahmebereitschaft an den regelmäßigen persönlichen Konsortialtreffen und eine gemeinsame Vorbereitung der Treffen in Online-Terminen im Vorfeld führte zu produktiven Arbeitstreffen mit schnell voranschreitenden Ergebnissen.

2.2 Haupt-AP 2: Diensteorientierte hardwarenahe Software

2.2.1 AP 2.1: Entwicklungsplattform für diensteorientierte E/E-Zonenarchitekturen

Das AP 2.1 umfasste die Entwicklung von Methoden und Technologie-Bausteinen, welche den Entwicklungsprozess vom Entwurf, der Konzeptphase, der Implementierung bis hin zu Verifikation und Validierung für diensteorientierte Architekturen unterstützten. Die Hardware- und Software-Bausteine umfassten dabei nicht nur eine Schnittstellentechnologie, sondern stellten ein ganzheitliches Entwicklungskonzept dar. Hierzu gehörten Verfahren zur dynamischen Re-Allokation von Diensten im Fehlerfall, sowie optimierte Auslegungsverfahren für die E/E-Architektur. Das Ausrollen von fahrzeugfremden Rechenaufgaben zur Steigerung der Ressourcen-Effizienz geparkter Fahrzeuge als Teil einer Infrastruktur für verteiltes Rechnen gehört dazu. Unterstützt wird das Entwicklungskonzept durch eine universelle Schnittstelle, die den Grad an Interoperabilität erhöht. Für den Vergleich mit traditionellen Entwicklungsmethoden wurde eine Architektur für das Wellbeing und das maschinelle Hören als Referenz erarbeitet.

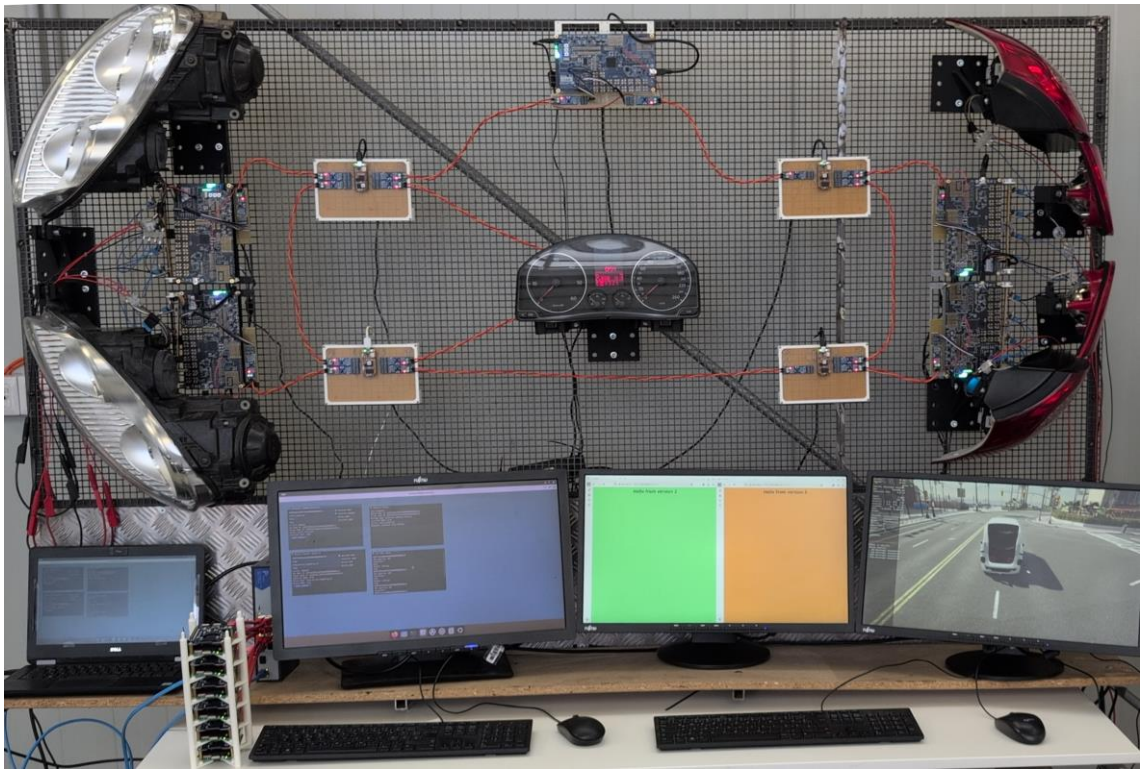


Abbildung 5: Demonstration einer zonalen E/E-Architektur auf Basis eines universellen Schnittstellenkonzepts.

Beiträge der beteiligten Projektpartner:

Das **Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen** hat ein Konzept für die Energieübertragung auf der universellen Schnittstelle Universal Automotive Bus (UAB) erarbeitet und entsprechende prototypische Platinen entwickelt und gefertigt. Um eine Bündelung von Energie und Daten auf dem gleichen Kabel zur Steigerung der Kosten- und Gewichtseffizienz zu erreichen, wurde eine zugehörige Datenübertragungs-Schnittstelle für den UAB konzeptioniert, entwickelt und umgesetzt. Zur Erreichung einer universellen Einsetzbarkeit wurde ein auf einem digitalen Komponentenzwilling beruhender Plug-and-Play-Mechanismus konzeptioniert und in Verbindung mit einem Tischaufbau bestehend aus E/E-Architektur und verbundenem virtuellen Fahrzeug demonstriert. Das Konzept des verteilten Rechnens wurde mittels eines eigens dafür entwickelten Container-Systems umgesetzt. Zur Demonstration wurde ein Tischaufbau bestehend aus mehreren Recheneinheiten präsentiert. Das Ausrollen von Software auf diese Recheneinheiten wurde mittels des Tischaufbaus demonstriert.

Das **Institut für Fahrzeugtechnik der Universität Stuttgart** erreichte alle Meilensteine. Eine innovative Methode zur proaktiven Fehlertoleranz wurde entwickelt und verifiziert. Die sog. Petal-Architektur bietet die strukturellen

Voraussetzungen, um die neu entwickelte Methode im Fahrzeugbereich nutzbar zu machen. Kern ist ein agentenbasiertes Konzept zur unterbrechungsfreien Live-Migration von Echtzeitdiensten, das ohne zentrale Steuerung auskommt und damit Single Points of Failure vermeidet. In einer Fallstudie wurde demonstriert, dass das entwickelte Prognoseverfahren einen drohenden Hardwareausfall frühzeitig erkennen kann. Der Datenstrom blieb unterbrechungsfrei erhalten, und der Wechsel erfolgte innerhalb eines unkritischen Zeitfensters.
Auch wurde eine Methode zur Optimierung von E/E-Architekturen entwickelt, die u. a. Gewichte, Kosten und elektr. Ausgeglichenheit berücksichtigt. Die Validierung erfolgte mit Daten aus UNICARagil sowie mit Daten eines Serien-SUVs. Durch Berücksichtigung u. a. von Gesamtarchitektur, Übertragungstechnologie, Package, Kabelstrang und Software unterstützt dieses Verfahren ein HW-SW-Co-Design, welches essenziell für zukünftige softwaredefinierte Fahrzeuge ist. Die Methodik ermöglicht eine automatisierte Evaluierung. Durch das Verarbeiten von Ergebnissen in einer Design Structure Matrix kann die Lösungsgüte in frühen Entwicklungsphasen in sehr kurzer Zeit beurteilt werden. Auch wurde ein automatisiertes Framework zur Design-Space-Exploration von automobilen E/E-Architekturen entwickelt. Es werden die Zuordnung von SW- zu HW-Komponenten, die ASIL-Dekomposition sowie das Routing und Scheduling von Nachrichten optimiert. Die gleichzeitige Berücksichtigung aller Aspekte bringt widersprüchliche Zielgrößen wie Kosten, Latenzzeiten und funktionale Sicherheit in Einklang. Es wurden Metriken wie das Probabilistic Metric for Hardware Failures (PMHF) in das Optimierungsmodell integriert, damit die Lösungen die Sicherheitsgrenzen gemäß ISO 26262 erfüllen.

Die **ZF Friedrichshafen AG** hat zur Zielerreichung, basierend auf der Anforderungsanalyse, die Anwendungsfälle des maschinellen Hörens und des Wellbeings, in den industriell eingesetzten Werkzeugen wie CAMEO für die logische und PREEvision für die technische Architektur modelliert, basierend auf der Anforderungsanalyse. Während dieser Arbeiten wurde eine System Definition- und Dokumentationsrichtlinie geschrieben, in derer das anzuwendende Vokabular, sowie die Prozesse in der Modellierung beschrieben sind. Diese Arbeiten dienten zum einen als Grundlage für eine Dokumentation entsprechend dem Entwicklungsprozess und weiter zur Beschreibung der Systemschnittstellen innerhalb und außerhalb des Fahrzeugs. Auf Basis dieser Arbeiten wurde die im Projekt geschaffene Entwicklungsplattform (ASOA-Tool) zur Beschreibung einer diensteorientierten Architektur mit den herkömmlichen Tools (CAMEO und PREEvision) und Entwicklungsprozessen verglichen. Daraus ist ein Dokument entstanden, welches mit RWTH-i11 ausgetauscht wurde, um so die Ergebnisse des Vergleichs zu dokumentieren, zu diskutieren und eine Erweiterung des ASOA-Tools zu ermöglichen. Der Hauptfokus lag dabei auf der Modellierung der Anwendungsfälle und somit der sukzessiven Ergänzung der modellierten Informationen, welche bei den Schnittstellen letztlich in enger Zusammenarbeit mit den Arbeiten aus AP 3.4 zu standardisierten Schnittstellen geführt hat. Die Architekturarbeiten für die ZF-Anwendungsfälle wurde bei den Meilensteinabgaben den Partnern vorgestellt und den anderen Arbeitspaketen bereitgestellt. Die Arbeiten wurden in einer Abschlussdokumentation zusammengefasst. Neben diesen Arbeiten wurden in AP-übergreifender Zusammenarbeit mit AP 3.4 als Haupttreiber exemplarisch eine Architektur des HIL-Systems in PREEvision umgesetzt, welche zur Beschreibung des TSN-Aufbaus diente. Motivation hinter diesen Arbeiten war die Analyse einer effizienten Konfiguration von TSN-Netzwerken aus modellierten Architektur-Informationen als Beitrag zur Unabhängigkeit von OEM-Ökosystemen. Die in diesem Arbeitspaket durchgeführten Arbeiten waren zum einen notwendig, um das Ziel zu erreichen und einen Vergleich der Entwicklungsplattformen zu ermöglichen und zum anderen Ideen zur Effizienzsteigerung im Systementwicklungsprozess zu untersuchen, sowie die Abstraktion der Fahrzeugplattform zu fördern.

2.2.2 AP 2.2: Diensteorientierte prädiktiv regelbare Leistungselektronik

Das AP 2.2 umfasste die Entwicklung einer Methode zur prädiktiven Regelung von Leistungselektronik, um die Lebensdauer der eingesetzten Komponenten deutlich zu verlängern. Darüber hinaus wurde ein optimiertes Routingverfahren entwickelt, das den aus UNICAR*agil* bekannten Ansatz der Diensteorientierung im Kraftfahrzeug aufgegriffen und auf die Berechnung einer ökologisch optimalen Route übertragen hat. Neben den grundsätzlichen Methoden stand die Validierung im Zentrum des AP. Hierzu wurden Daten aus einem Realfahrzeug von ZF über einen Clouddienst der RWTH and das Prädiktionsmodell der UniS übermittelt. Die im digitalen Zwilling berechneten Parameter wurden dann über den Clouddienst an das Fahrzeug zurückgesendet.

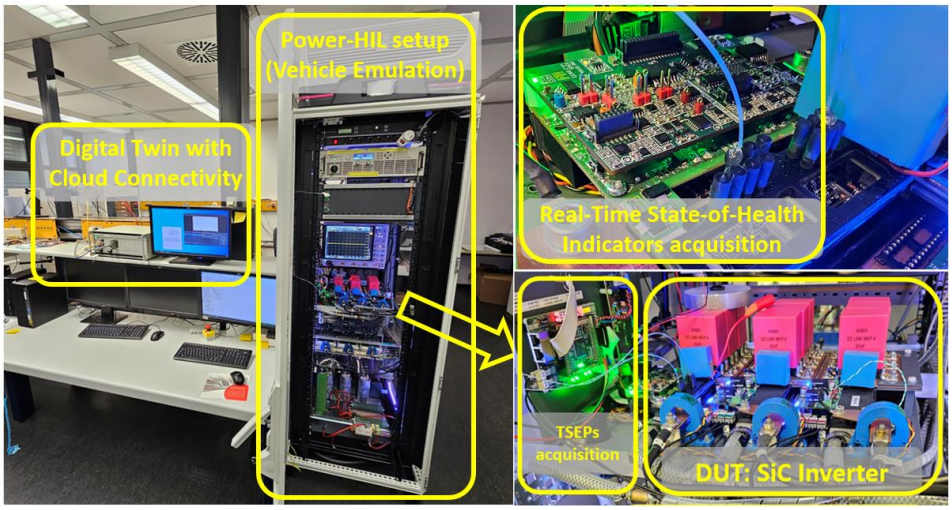


Abbildung 6: Prädiktive Regelung des Antriebsinverters, wahlweise im realen Fahrzeug, im echtzeitfähigen digitalen Zwilling und im Hardware-in-the-Loop-Test mit Zustandsüberwachung

Beiträge der beteiligten Projektpartner:

Das **Institut für Robuste Leistungshalbleitersysteme der Universität Stuttgart** erreichte alle definierten Ziele. Traktionswechselrichter wurden zu aktiven digitalen Teilnehmern serviceorientierter Automobilarchitekturen umgewandelt, die Daten zum State-of-Health (SoH) und zur verbleibenden Nutzungsdauer (Remaining Useful Life, RUL) liefern. So wurden eine Lebensdauerverlängerung, eine vorausschauende Wartung und eine ökologische Routenplanung ermöglicht. Es wurde ein prädiktiver Regelungsansatz entwickelt, der definierte Anforderungen und ein systemorientiertes Wechselrichtermodell berücksichtigt. Der Wechselrichter erreichte lebensdauerorientierte Temperaturverläufe, ohne die Antriebsstrangsteuerung zu beeinträchtigen. Tests bestätigten, dass die prädiktive Regelung Temperaturwechsel mindert und die Lebensdauer des Wechselrichters um bis zu 60 % verlängern kann. Ein Degradationsmodell für SiC-MOSFETs, das SoH-/RUL-Schätzungen integriert, wurde durch die Kombination physik. Ansätze mit ML entwickelt. Temp.-sensitive elektrische Parameter (TSEPs) wurden anhand nichtlinearer Kurven degradiert. Neuronale Netze unterschieden zwischen Degradation und Temp.-Schwankungen und ermöglichten eine genaue SoH-/RUL-Schätzung auf Chip- und Gehäuseebene. Auf der Rapid-Control-Prototyping-Plattform SCALEXIO wurde ein digitaler Zwilling aus Modulen zur Vorhersage der Sperrschichttemperatur/Rekuperation und zur kontinuierlichen SoH/RUL-Schätzung implementiert und über Echtzeitkomm. mit dem HIL-Setup gekoppelt. Eine Wechselrichterplattform ermöglichte eine realistische Lastemulation, Online-TSEP-Erfassung, direkte Messung der Sperrschichttemp. (OpSens), Aufbau eines Datensatzes und Verifikation der Genauigkeit des digitalen Zwillings unter fahrzeugähnlichen Bedingungen. Der Demonstrator integrierte das Power-HIL-Setup mit SCALEXIO-Algorithmen, prädiktiver Steuerung, hybr. Alterungsmodellen, SoH/RUL-Schätzung, RWTH-Cloud-Eingaben aus dem ZF-Fahrzeug und einer GUI. Publiziert u. a.: EUROCON, PCIM, SPEC, DMC.

Die **ZF Friedrichshafen AG** hat in diesem Arbeitspaket eine seriennahe Anwendung wie das EcoControl 4 ACC in das Projekt eingebracht, um die Synergie mit der diensteorientierten Routenplanungsfunktion zur Verbesserung der Fahrzeuggesamteffizienz im ZF eigenen Demonstrator-Fahrzeug zu untersuchen. Hierzu wurde zunächst ein Konzept entwickelt, um die Fahrzeuggesamteffizienz simulativ bewerten zu können. Das Konzept wurde in einer Cloudumgebung implementiert, sodass verschiedene Routingoptimierungsansätze untersucht werden konnten. Auf Basis der Simulationsergebnisse wurde der beste Ansatz ausgewählt und im weiteren Verlauf des Projektes als Dienst in der Cloud implementiert. Dieser Dienst wurde über eine definierte Schnittstelle mit dem Fahrzeug vernetzt. Weiter konnte die Schnittstelle zur Optimierung der Leistungshalbleiterelektronik mit der UniS-ILH abgestimmt und implementiert werden. Dieses Konzept wurde bereits bei der Zwischenpräsentation im Newsletter zur ELIV-Konferenz veröffentlicht und erfolgreich bei der Abschlusspräsentation präsentiert. Die durchgeführten Arbeiten waren notwendig, um zum einen den Betrieb des Fahrzeugs zu ermöglichen und zum anderen die Konzepte umzusetzen, sodass die Ergebnisse erfolgreich präsentiert werden konnten. Zur Fortschreibung der Ergebnisse ist es vorgesehen, die Konzepte mit Felddaten von ZF genauer zu untersuchen, um so weiteres Optimierungspotential zu erschließen.

2.2.3 AP 2.3: Hochintegrierte, neuromorphe, diensteorientierte Perzeption für den Niedriggeschwindigkeitsbereich

Das AP 2.3 umfasst eine Reihe von Bausteinen im Umfeld des Themas neuromorphe Perzeption sowie Sensordatenverarbeitung und Sensor-Modellierung. Auf Hardwareseite wurden im Rahmen des AP ein neuromorphes Sensormodul vom Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt und ein Sensorcluster von Valeo Schalter und Sensoren GmbH konzeptioniert und aufgebaut. Das upgradefähige Sensormodul der TU Darmstadt wurde zur Demonstration der Upgradefähigkeit um eine Event-based Camera erweitert. Im Bereich der Algorithmik befasste sich AP 2.3 mit der Bewertung und Optimierung von Perzeptionsalgorithmen. Dazu wurden auf Seite der TU Darmstadt Metriken zur Bewertung von Perzeptionsalgorithmen erforscht. Im Bereich der Optimierung von spikenden Neuronalen Netzen wurde erforscht, wie sich Optimierungsmethoden von artificial Neural Networks auf spikende Netze auswirken. Methodisch wurde auch die Qualifizierung von Sensormodellen von Event-based Camera erforscht, wie auch die Upgradefähigkeit von elektronischen Systemen.

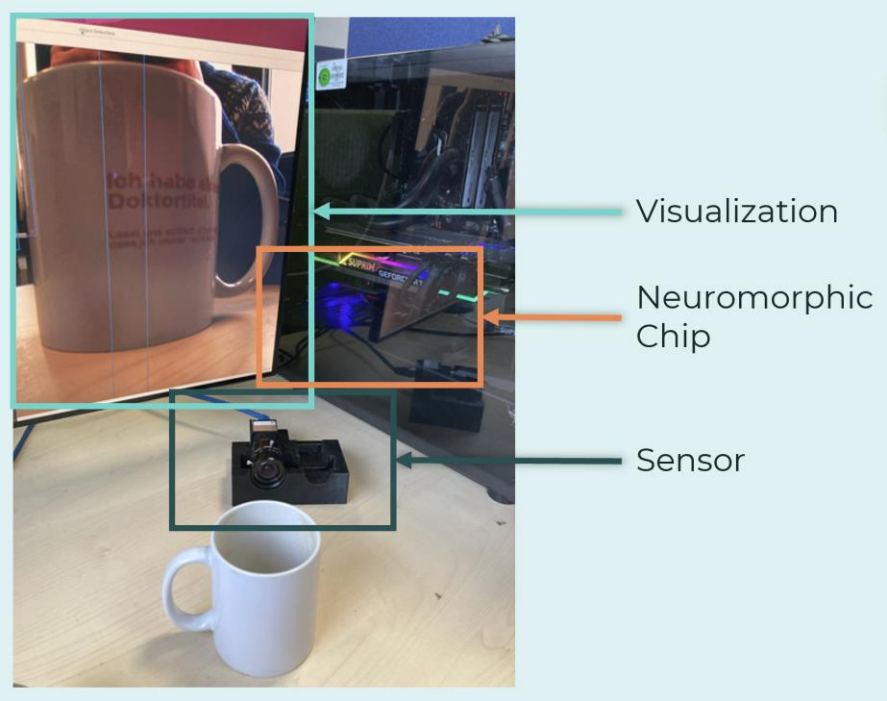


Abbildung 7: Darstellung des aufgebauten neuromorphen Sensormoduls mit der Kamera als Sensor, dem verbauten neuromorphen Chip sowie der Visualisierung der Ergebnisse der Objekterkennung.

Beiträge der beteiligten Projektpartner:

Das **Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt (FZD)** recherchierte im Rahmen von AP 2.3.1 den Stand der Technik im Bereich neuromorpher Hardware, mit besonderem Fokus auf Perzeptionsalgorithmen und den Einsatz von Event-Based Cameras. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden Anforderungen an ein updatefähiges, neuromorphes Sensormodul formuliert, das auf der Nutzung einer Event-Based Camera basiert. Anschließend wurden Konzepte für ein solches Sensormodul entwickelt. Auf diesen aufbauend erfolgte der Aufbau und die Inbetriebnahme des neuromorphen Sensormoduls.

In Arbeitspaket 2.3.2 erarbeitete FZD die Sensor-Modellierung und Qualifizierung von Event-Based Cameras. Dies umfasste eine Recherche zum aktuellen Stand der Technik, gefolgt von der Definition relevanter Anforderungen. Auf dieser Basis wurden Konzepte für die Modellierung und Qualifizierung entwickelt. Zur Validierung wurde eine geeignete Testumgebung aufgebaut, die es ermöglichte, die Modelle zu erproben und zu bewerten. Abschließend erfolgte die Qualifizierung der Modelle.

Das **Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt (FZD)** hat in Arbeitspaket 2.3.4 die Entwicklung und Optimierung energieeffizienter, KI-basierter Perzeptionsalgorithmen mit besonderem Augenmerk auf Energieverbrauch, Latenz und Güte beforscht. Nach einer Analyse des Stands der Technik in diesem Bereich wurden Kriterien zur Gesamtoptimierung dieser Aspekte erarbeitet. Zudem erfolgte eine Analyse bestehender Systemarchitekturen in Hinblick auf Effizienz, Güte und Absicherungsaufwand in Abstimmung mit Arbeitspaket 6.2. Schließlich wurden Methoden zur Optimierung von Algorithmen entwickelt und praktisch angewendet, sowohl auf Systemarchitekturen als auch auf Spiking Neural Networks auf neuromorphen Chips.

In Arbeitspaket 2.3.5 erfolgt von Seiten der TU Darmstadt die Evaluation der durchgeführten Optimierungsmethoden anhand der definierten Kriterien aus AP 2.3.4.

In Arbeitspaket 2.3.6 untersuchte FZD die Upgradefähigkeit elektronischer Systeme. Dazu wurden zunächst passende Testkriterien definiert und ein spezifisches Testkonzept entwickelt. Anschließend erfolgte ein Hardwareupdate mit Integration einer Event-Based Camera in enger Abstimmung mit Arbeitspaket 6.2. Abschließend wurden die Methoden zur Upgradefähigkeit bewertet und optimiert.

Die **Valeo Schalter und Sensoren GmbH** war exklusiv im Arbeitspaket 2.3 aktiv. Ziel war die Entwicklung und Validierung von Methoden zur Berechnung und Synthese von Sensorrohsignalen für Ultraschall, Radar, LiDAR und Kamera Perzeptionssensorik unter realen Umwelt- und Einsatzbedingungen. Hierfür wurde als DuT das ISO-Standardhindernis (Würfel mit 11 cm Kantenlänge) verwendet. In mehr als 100.000 Messaufnahmen wurden umfangreiche Variationen hinsichtlich Positionierung, Orientierung, rauschfreie und rauschbehaftete sowie verschiedene Untergründe (Asphalt trocken/nass, Schotter, Gras) erfasst. Diese Datengrundlage diente dem Training und der Auswertung verschiedener KI-Modelle mit dem Ziel, plausible, physikalisch konsistente Rohsignale generieren zu können.

Im Methodenvergleich erwies sich der Conditional Variational Autoencoder (cVAE) als leistungsfähigste und robusteste Lösung. Durch die Konditionierung auf Szenen- und Sensorparameter (z. B. Distanz, Winkel, Untergrund, Nässe, Sensorkonfiguration) bildet der cVAE einen Latent Space, in dem eigenschaftserhaltendes Sampling möglich ist. Dies erlaubt die Synthese realistischer Rohdaten für beliebige Szenenkonstellationen im relevanten Parameterraum – einschließlich schwer messbarer Corner Cases. Gegenüber alternativen Ansätzen zeigte der cVAE stabile Rekonstruktionsfehler, gute Varianzabdeckung und hohe physikalische Plausibilität der erzeugten Signale.

Der zentrale Mehrwert liegt darin, dass über den Latent Space gezielt Datensätze für Simulation, Test und Absicherung generiert werden können, ohne jede Konstellation real vermessen zu müssen. Damit können Sensorcluster systematisch optimiert werden (z. B. Abwägung von Radar-Blickwinkeln, LiDAR-Auflösung, Anzahl und Ausrichtung von Ultraschallsensoren) und Trade-Offs zwischen Kosten, Komplexität und Leistungsfähigkeit transparent analysiert werden. Zudem ermöglicht die Cross-Modal-Plausibilisierung (Kohärenzprüfungen zwischen Domänen) eine qualitative Absicherung der generierten Daten.

In ergänzenden Experimenten zeigte sich, dass aus den Rohsignalen der Untergrund zuverlässig klassifizierbar ist: Das DuT ließ sich eindeutig hinsichtlich trockener/nasser Asphalt, Schotter und Gras unterscheiden. Diese Fähigkeit eröffnet neue Wege für Kontext-Adaption in der Signalverarbeitung (z. B. Filter- und Dynamikparameter), für Reibwert-/Traktionseinschätzung sowie für robuste Perzeption unter variierenden Umgebungsbedingungen.

Insgesamt liefert Valeo mit dem entwickelten generativen Multisensor-Framework einen skalierbaren Baustein für datengetriebene Entwicklung, Absicherung und Cluster-Auslegung im Niedriggeschwindigkeitsbereich (z. B. Parken, Manövrieren, VRU-Schutz). Die Ergebnisse sind direkt verwertbar (Data Augmentation, Corner-Case-Szenarien, Sensitivitätsanalysen) und bilden die Basis für weiterführende Forschung, insbesondere im Rahmen der beteiligten zwei Promotionsvorhaben zu robuster Generierung, Domänenadaption und physikalischer Konsistenz.

2.3 Haupt-AP 3: Sicherheitsqualifizierte diensteorientierte Softwarearchitektur

2.3.1 AP 3.1: Skalierbare diensteorientierte Softwarearchitektur

Das AP 3.1 umfasste die ganzheitliche Untersuchung einer dynamischen Orchestrierung von Fahrzeugfunktionen und -ressourcen. Grundlegend war ein mehrstufiges Optimierungsmodell, das Dienst- und Hardwarearchitektur gemeinsam betrachtet. Nebenbedingungen wie Peripheriezugriff, Rechenleistung und Bandbreite wurden mit den Zielfunktionen Energieverbrauch, End-to-End-Timing und Verfügbarkeit verknüpft; durch eine variable Gewichtung lassen sich Prioritäten situationsabhängig verschieben. Um die Ausführungsplattform über das Fahrzeug hinaus zu erweitern, wurden Entwürfe für die Auslagerung von Funktionen auf Road-Side-Units sowie Cooperative Perception mithilfe externer Sensorik konzipiert. Dafür müssen Dienste mitsamt Laufzeitzustand migrierbar sein. Ausgewählte V2X-Standards (ETSI CAM, DENM, IVIM u. a.) und passende Protokolle können Edge-Nodes in die interne Kommunikation einbinden und eine prototypische Laufzeitumgebung für Task-Offloading schaffen. Für eine flexible Anpassung der Wirkketten entstand ein deklaratives JSON-Format: Jeder Dienst wird durch eine eindeutige ID, seine Schnittstellen und die optimierte Ausführungsplattform beschrieben. Wird dem Orchestrator als zentrale kontrollierende Einheit eine solche Spezifikation übergeben, vergleicht er Soll- und Ist-Zustand und führt mit minimalem Änderungsaufwand Deployment, Start/Stop, sowie das Verbinden und Trennen der Schnittstellen durch. Um eine höhere Resilienz zur Laufzeit zu erhalten, bietet das integrierte Qualitätsvektorkonzept redundante Instanzen und alternative Rückfallebenen. Die technische Machbarkeit dieser Konzepte demonstriert der in Abbildung 8 dargestellte und im Rahmen des APs entstandene Versuchsaufbau: Heterogene Steuergeräte und Switches sind zu einer TSN-fähigen zonalen E/E-Architektur vernetzt; ein Touch-Display visualisiert live, wie Dienste miteinander interagieren. Der Demonstrator zeigt, dass eine dynamische Orchestrierung von Funktionen und Ressourcen realisierbar ist. Durch einen Klick auf einen Betriebsmodus wird neu orchestriert.

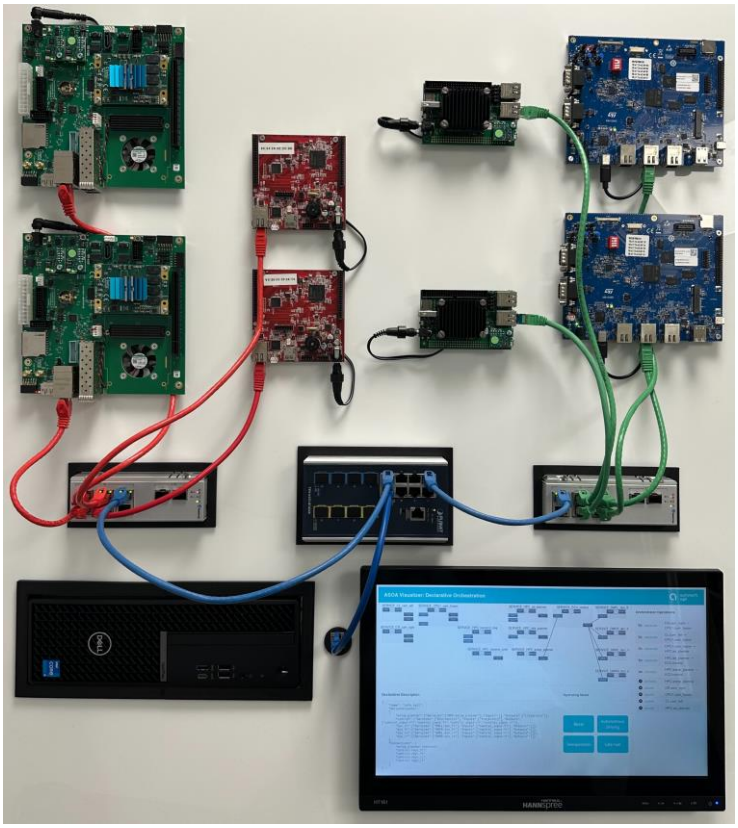


Abbildung 8: Versuchsträger und Demonstrator der dynamischen Orchestrierung von Funktionen und Ressourcen

Beiträge der beteiligten Projektpartner:

Der **Lehrstuhl Informatik 11 der RWTH Aachen** hat im Rahmen von AP 3.1.1 die optimierte Nutzung der in der E/E Architektur des Fahrzeugs zur Verfügung stehenden Rechenressourcen untersucht. Dazu wurden geeignete Modelle der Dienste-Architektur und der Hardware-Architektur erstellt und in weiteren Iterationen verfeinert. Durch geeignete Formulierung der Nebenbedingungen des Optimierungsproblems werden Anforderungen der Dienste an Peripherie, Rechenleistung und Bandbreite berücksichtigt. Mithilfe der Zielfunktionen eines mehrstufigen Optimierungsproblems werden für die benötigten Dienste eine passende Ausführungsplattform und geeignete Ausführungsparameter gefunden, welche hinsichtlich des gesamten Energieverbrauchs der benötigten Steuergeräte, der gesamten Ausführungsdauer einer Wirkkette (Timing) und der Verfügbarkeit von sicherheitskritischen Diensten (Safety) optimal ist. Durch die Modularität des formulierten Optimierungsproblems lassen sich die die verschiedenen Ziele unterschiedliche stark gewichten.

Im Rahmen von AP 3.1.2 wurde die Erweiterung der Systemgrenzen der ASOA über das Fahrzeug hinaus adressiert. Zunächst wurden Use Cases definiert, welche die Nutzung von Road Side Units (RSU) und der Infobiene vorsehen. Dabei stand die Auslagerung von Diensten (Function Offloading) sowie die Unterstützung der Perzeption durch externe Sensorik (Cooperative Perception) im Fokus. In der anschließenden Anforderungsanalyse wurde festgelegt, dass ASOA-Dienste inklusive ihres Zustands verschiebbar sein müssen. Zudem wurden geeignete Kommunikationsstandards und -protokolle identifiziert, um interne und externe Verbindungen sowie die Integration externer Ressourcen in die Orchestrierung zu ermöglichen. Darauf aufbauend entstand ein Konzept zur Systemgrenzen-Erweiterung, welches die Einbindung von Edge-Nodes, die Nutzung von ETSI-V2X-Nachrichten (CAM, DENM, IVIM, …) sowie eine prototypische Runtime-Umgebung für Task Offloading umfasst.

Innerhalb des AP 3.1.3 wurde eine Methodik zur deklarativen Beschreibung von Wirkketten entwickelt. In Form eines JSON-Formats lassen sich Dienste durch eindeutige Bezeichner und die vorhandenen Schnittstellen inklusive ihrer optimalen Ausführungsplattform definieren. Die deklarierte Ausführungsplattform kann aus der optimierten Zuweisung (AP 3.1.1) entnommen werden. Der Orchestrator wurde so erweitert, dass er bei Übergabe der deklarativen Beschreibung die bestehende mit der gewünschten Wirkkette vergleicht und mit minimalen Änderungen die aktuelle Wirkkette in die gewünschte überführt. Dies beinhaltet das Deployment, Starten/Stoppen von Diensten, sowie das Verbinden und Trennen ihrer Schnittstellen. Das Konzept wurde erweitert, sodass Teile des Qualitätsvektorskonzept (AP 1) abgebildet werden können und damit Rückfallebenen und Redundanzen zur Laufzeit möglich sind. Die deklarative Beschreibung erlaubt eine kompakte, modulare und wartbare Spezifikation der Softwarearchitektur, die die Nutzung der ASOA auch fachfremden Personen zugänglich macht.

2.3.2 AP 3.2: Diensteorientierte Diagnose

Das AP 3.2 umfasste Aufgaben im Bereich der Entwicklung und Verbesserung diagnostischer Fähigkeiten im Rahmen der ASOA. Zunächst wurde die Diagnosefähigkeit einzelner ASOA-Dienste, und der Dienstarchitektur erweitert, sodass die Erkennung und Korrektur von Fehlern in allen Phasen der Dienste-Entwicklung, bis hin zum Post-Deployment, durchgeführt werden kann. Hierfür wurde ein Qualitätsvektor konzipiert und in die einzelnen Dienste eingeführt, damit eine qualitative Degradation im System frühzeitig erkannt werden kann. Zusätzlich wurde ein Konzept zur zustandserhaltenden Dienstevolution erforscht. Ergänzend wurden Softwarefehler als eigenständige Diagnoseklassen integriert. Es wurde ein ASAM-SOVD Diagnose-Gateway entwickelt, welches aggregierte Diagnoseinformationen aus der ASOA zur Verfügung stellt. Aufbauend auf diesen Informationen wurde ein Diagnose-Zwilling konzeptioniert und umgesetzt. Der Zwilling verwendet zudem Wirkkettenspezifische Diagnose-Informationen, wodurch auch der dienstinterne Datenfluss und Verschaltungszustand orchestrationsunabhängig betrachtet werden kann.

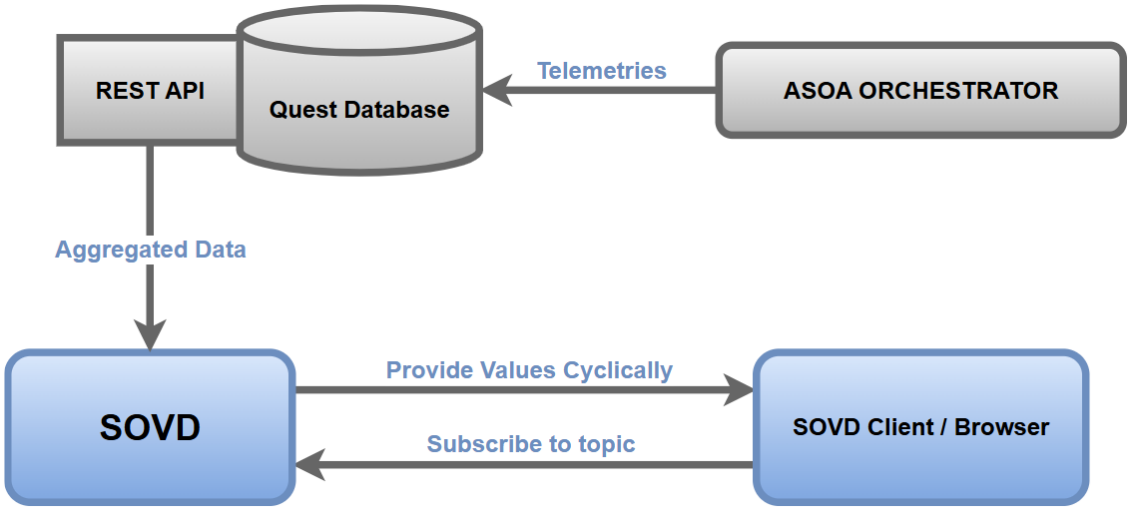


Abbildung 9: Prinzipskizze der Integration des SOVD-Diagnosesystems in die ASOA-Struktur.

Beiträge der beteiligten Projektpartner:

Die **DSA Daten- und Systemtechnik GmbH** hat im Rahmen des Projekts untersucht, wie klassische Diagnosestrategien auf serviceorientierte Fahrzeugarchitekturen übertragen und für zukünftige Software-definierte Fahrzeuge nutzbar gemacht werden können. Ziel war es, eine durchgängige Diagnosefähigkeit auf Dienstebene bereitzustellen, Qualitätsdegradierungen frühzeitig zu erkennen und Softwarefehler in der Orchestrierung und Ausführung von Diensten systematisch zu diagnostizieren.

Ein wesentlicher Fokus lag auf der Erkennung und Diagnose von Degradierungen der Qualitätsvektoren sowie der Klassifizierung von Softwarefehlern als eigenständige Diagnoseobjekte. Hierzu wurde ein ASAM-SOVD-Server implementiert, der als zentrales Diagnose-Gateway die relevanten Informationen aller Dienste bereitstellt. Durch die Integration des Servers in das Zielsystem konnte eine konsistente Beobachtung der Laufzeitumgebung etabliert werden. Dies umfasste sowohl die Überwachung des Orchestrators als auch der einzelnen Dienste, um Abweichungen von definierten Qualitätszielen zu detektieren.

Ein weiterer wichtiger Beitrag war die Erweiterung der Diagnosemodelle um Softwarefehler als eigene Diagnoseklasse. Auf diese Weise konnten nicht nur Hardware- oder Kommunikationsprobleme adressiert werden, sondern auch fehlerhafte Service-Implementierungen oder orchestrierungsbedingtes Fehlverhalten systematisch erkannt und zugeordnet werden. Damit wurde eine Grundlage geschaffen, um Fehlerbilder in komplexen, dynamischen Softwarelandschaften effizient analysieren und automatisiert bewerten zu können.

Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass durch die Kombination von standardisierten Diagnose-Schnittstellen, systematischer Laufzeitüberwachung und erweiterter Fehlerklassifikation ein wesentlicher Schritt hin zu prädiktiver Diagnose und vorausschauender Wartung in serviceorientierten Fahrzeugarchitekturen erreicht werden konnte. Dies legt den Grundstein für eine zukunftssichere und skalierbare Diagnoseinfrastruktur, die den Anforderungen von SDVs gerecht wird und den Betrieb komplexer, verteilter Fahrzeugsysteme nachhaltig unterstützt.

Der **Lehrstuhl Informatik 3 der RWTH Aachen** hat im Rahmen des Projekts die Diagnose einer Serviceorientierten Fahrzeugarchitektur mithilfe eines Diagnosezwillings untersucht. Ein wichtiger Beitrag hierbei war insbesondere die Entwicklung eines Diagnosedienstes im Fahrzeug zur Sammlung von Daten, sowohl für den Diagnosezwilling, als auch für die Live-Diagnose über SOVD. Der Dienst zeichnet aggregierte Laufzeitdaten, Qualitätsdaten, Diagnostic Trouble Codes sowie Wirkketteninformationen der einzelnen Fahrzeugdienste auf. Somit ermöglicht der Diagnosezwilling eine automatisierte Erkennung eines degradierten Systems, indem der allgemeine Systemzustand zu jedem Zeitpunkt nachvollziehbar aufgezeichnet wird. Bei Degradation des Systemzustands können somit die Wirkketten auf Nachrichtenebene zurückverfolgt werden, um Softwarefehler in dynamisch verschalteten Service-orientierten

Architekturen nachvollziehbar zu machen. Hierbei wurde der Diagnosezwilling durch Hardware-in-the-loop Tests während der Entwicklung kontinuierlich evaluiert.

Die Degradationserkennung basiert auf dem im Projekt entwickelten Konzept des Qualitätsvektors. Bei nicht degradierten Diensten werden die Laufzeitdaten nur aggregiert aufgezeichnet, um die Datenmenge handhabbar zu machen. Degradierte Wirkketten hingegen werden vollständig aufgezeichnet, sodass die Ursache der Degradation mithilfe der Wirkkettenrückverfolgung auf Nachrichtenebene nachvollzogen werden kann. Hierbei erlaubt der Diagnosezwilling auch das Setzen zusätzlicher eigener Filter für die Fahrzeugdaten, sodass sich Trends wie beispielsweise eine abnehmende Frequenz von Dienstnachrichten erkennen lassen, welche langfristig eine Degradation auslösen können. Somit kann der Digitale Zwilling Degradation sowie Softwarefehler hervorsagen, bevor ein Dienst seine garantierte Qualität nicht mehr erfüllt und degradiert. Die Qualität des Diagnosezwillings selbst hängt maßgeblich von der Aktualität der Daten und den definierten Filterfunktionen zum Voraussagen von Degradationen ab.

Die Modellbasierte Entwicklung des Diagnosezwillings ermöglicht einen generativen Ansatz um allgemeine Schnittstellen sowie Diagnosefunktionalitäten aus den Modellen generieren zu können, sodass das Hinzufügen neuer Dienste dynamisch möglich ist. Dienstspezifische Filterfunktionen zur prädiktiven Wartung müssen hierbei mithilfe des Dienstentwicklers für den jeweiligen Dienst einzeln identifiziert werden.

Der **Lehrstuhl Informatik 11 der RWTH Aachen** hat im AP 3.2.1 zunächst die Diagnosefähigkeiten der ASOA erweitert. Hierzu wurden vorher ermittelte benötigte Diagnosefunktionen der ASOA in ein gemeinsames Diagnoseschnittstellen-Konzept überführt. Anschließend wurden diese Kontroll- und Diagnoseschnittstellen in das bestehende ASOA-Framework integriert und implementiert. Diese Schnittstellen umfassen unter anderem neu konzipierte Fehlerklassen für unabhängig diagnostizierbare Fehler oder den Qualitätsvektor. Ein wichtiger Beitrag war hier die Konzeption einer ASOA-integrierten, orchestrationsunabhängigen Diagnosedatenerhebung, durch die speziell der dynamische Datenfluss zwischen Diensten in Form sogenannter Wirkketten erfasst und aufgezeichnet werden kann. Die Erweiterung der Dienste, um eine transparente Kommunikation der dienstinternen Verschaltung von Funktionen und des internen Datenflusses in das externe System, ermöglicht nun eine vollsystematische Übersicht über Wirkketten auf Inter- und Intradienstebene. In AP 3.2.5 wurde ein Konzept zur zustandserhaltenden Dienstevolution entwickelt und prototypisch implementiert.

2.3.3 AP 3.3: Integration in industrielle Plattformen und Methoden

Das AP 3.3 befasste sich mit der Kopplung und deterministischen Ausführung von sicherheitskritischen Fahrzeugfunktionen durch die Integration der AUTOSAR Classic Plattform (CP) und der AUTOSAR Adaptive (AP) Plattform. Als zentraler, industriell relevanter Anwendungsfall diente die prädiktive Rekuperationsregelung (Recuperation Balancing).

Ein wesentlicher Schwerpunkt lag auf der Realisierung einer ausfallsicheren und pragmatischen CP/AP-Kopplung. Ausgehend von der Erarbeitung von Spezifikationsmethoden zur einheitlichen zeitlichen Budgetierung mittels SL-LET wurde ein Monitor-System implementiert, bei dem die CP-Seite die Antwortzeiten von AP-Requests überwacht und bei einem Timeout automatisch einen Fallback-Modus mit reduziertem Funktionsumfang aktiviert. Dieser Mechanismus wurde am Use-Case demonstriert und durch ein webbasiertes Live-Dashboard sowie ein physikalisches Showcase-System visualisiert.

Dabei wurden neue Methoden zur Bewältigung der Herausforderungen beim Entwurf deterministischer Software entwickelt und in die Praxis überführt. Hierbei spielte System-Level Logical Execution Time (SL-LET) eine Schlüsselrolle, um die Vorteile agiler Programmierung und serviceorientierter Architekturen (SOA) mit signalbasierten Systemen zu kombinieren. Der SL-LET-Entwicklungsprozess wurde erarbeitet und führte zur fundamentalen Unterscheidung zwischen dem Designmodell (D-LET) und dem Implementierungsmodell (I-LET), um konsistente Austauschformate zwischen den industriellen Stakeholdern zu gewährleisten.

Weiterhin wurde die Standardisierung von SL-LET verbessert. Dies resultierte in einem Modellupdate im AUTOSAR Release R24-11 und der Entwicklung eines Konzepts zur expliziten Repräsentation von SL-LET-Intervallen, API und Monitoring für die Adaptive Plattform. Die Umsetzbarkeit wurde durch einen Proof-of-Concept in einem Adaptive Stack bestätigt.

Ein weiterer Aspekt war die Analyse von Orchestrierungskonzepten im Vergleich zwischen Adaptive Plattform und der ASOA. Dabei wurde festgestellt, dass die AP zwar konzeptionelle Ähnlichkeiten aufweist, ihr jedoch die Unterstützung für dynamische Inter-Service-Verbindungen zur Laufzeit fehlt. Aus diesem Grund wurden Erweiterungsvorschläge zur Schaffung einer flexiblen Runtime-Orchestrierung eingebracht, indem das Communication Management sowie das State Management der AP entsprechend angepasst werden muss.



Abbildung 10: Demonstrator auf Basis Infineon TC39 und NXP S32G3. Kopplung AUTOSAR Classic und Adaptive für den Use-Case “Recuperation Balancer”.

Beiträge der beteiligten Projektpartner:

Das **Institut für Datentechnik und Kommunikationsnetze der TU Braunschweig** hat, gemeinsam mit den Projektpartnern in AP 3.3, neue Methoden zur Bewältigung der Herausforderungen beim Entwurf deterministischer Software für sicherheitskritische Systeme entwickelt. Anhand des industriellen Use Cases „Recuperation Balancing" wurde mithilfe von System-Level Logical Execution Time (SL-LET) sowie am Beispiel AUTOSAR Adaptive/Classic gezeigt, wie sich die Vorteile von agiler Programmierung und serviceorientierten Architekturen (SOA) in Kopplung mit signalbasierten Systemen nutzen lassen. Die Ergebnisse wurden in einem physischen Demonstratorsystem umgesetzt, welches die Überführung der in autotech.agil erzielten Ergebnisse in die industrielle Praxis zeigt. Für die Anbindung serviceorientierter Kommunikation an signalbasierte Systeme wurden Spezifikationsmethoden entwickelt, welche eine einheitliche zeitliche Budgetierung mithilfe von SL-LET ermöglichen. Gleichzeitig wurden verbesserte Möglichkeiten zum plattformübergreifenden Monitoring serviceorientierter Architekturen geschaffen. Die Ergebnisse wurden gemeinsam mit dem Partner VI in den AUTOSAR-Standard eingebracht. Des Weiteren wurde ein konzeptioneller Vorschlag zur AUTOSAR-konformen Implementierung der Kopplung ausgearbeitet. Im regelmäßigen Austausch mit den Projektpartnern wurde die Notwendigkeit identifiziert, eine gemeinsame Definition des Automotive-Softwareentwicklungsprozesses mit SL-LET zu erarbeiten, um die Ergebnisse von Spezifikation und Implementierung dort konsistent einzubetten.

Begonnen wurde mit der Rollendefinition und Festlegung von Zuständigkeiten in einzelnen Phasen des Prozesses. Dies führte zur Entwicklung von Konzepten zur Modellierung gegenseitiger Störungen von Softwarekomponenten auf Plattformebene. Dieser quantitative Einfluss kann durch Rückführung in die Spezifikation in den Prozess aufgenommen werden. Ein Ergebnis dieser Arbeiten war die gemeinsame Identifikation der Notwendigkeit, Design- und Implementierungsmodell zu trennen. Mit der Einführung von D-LET und I-LET konnten konsistente Austauschformate zwischen industriellen Stakeholdern erreicht werden. Eine gemeinsame Veröffentlichung auf der ERTS 2026 ist in Vorbereitung. Darüber hinaus wurden die Projektergebnisse in verschiedenen Workshops sowie in AUTOSAR Gremien mit Industrievertretern diskutiert, um den Wissenstransfer in die Industrie aktiv voranzutreiben. Parallel dazu wurde anhand des industrierelevanten Use Cases „Recuperation Balancing" in einem stufenweise aufgebauten partnerübergreifendem Demonstrator gezeigt, wie sich die konzeptionellen Methoden praktisch umsetzen lassen. Ausgehend von der Anforderungsdefinition für den Use Case und die Hardware-Software-Plattform erfolgte die Auswahl und Ausgestaltung der realisierten Ausbaustufen. Anschließend wurden Softwarearchitektur und -funktionalität konzeptionell entwickelt, um die Basis für die Modellierung und Implementierung mit industriellen Tools zu bilden. Aufbauend auf einem LET-System in AUTOSAR Classic ist ein SL-LET-Timingmodell sowie eine entsprechende Implementierung für die Anbindung von AUTOSAR Adaptive entstanden. Um die Projektergebnisse zugänglicher zu machen, wurde außerdem ein Showcase-System entworfen und realisiert, das als physikalische Schnittstelle für die Softwareregelung des Demonstrators dient.

Die **Mercedes-Benz AG** hat im Rahmen des Projekts zusammen mit den Projektpartnern die Kopplung von AUTOSAR Classic (CP) und Adaptive Plattform (AP) realisiert. Statt komplexer Kommunikationsstandards wie DDS wurde ein pragmatischer Ansatz gewählt: Die CP-Seite überwacht Antwortzeiten von AP-Requests und aktiviert bei Timeouts einen Fallback-Modus mit reduziertem Funktionsumfang. In Workshops wurden zunächst für die Automobilindustrie relevante Hardware-Plattformen ausgewählt, dann die Randbedingungen zur Kopplung einer AUTOSAR CP Plattform mit einer µP-Plattform mit AUTOSAR Adaptive identifiziert. Als funktionaler Use-Case für die Forschungsarbeiten sowie einer geeigneten Demonstration zu Projektabschluss, wurde "Recuperation Balancing" umgesetzt. Bei Ausfall des AP-Brake Balancers greift eine CP-Fallback-Implementierung mit reduziertem Funktionsumfang. Eine Analyse des (agilen) Entwicklungsprozesses für LET-Systeme im AUTOSAR-Kontext ergab die Notwendigkeit zur Unterscheidung von D-LET (LET-Design) und I-LET (LET-Implementierung und Integration). Eine Veröffentlichung hierzu ist für das erste Halbjahr 2026 auf der ERTS2026 in Toulouse geplant. Zur Demonstration wurde der Use-Case in der Programmiersprache C implementiert und ein webbasiertes Live-Dashboard zur Visualisierung erstellt.

Die **Vitesco Technologies GmbH** (ab 01.10.2024 Teil der Schaeffler AG) hat gemeinsam mit den Projektpartnern aus dem Arbeitspaket 3.3 neue Methoden zur Bewältigung der Herausforderungen beim Entwurf deterministischer Software für sicherheitskritische Systeme entwickelt. Am Beispiel des industriellen Anwendungsfalls „Recuperation Balancing"

wurde unter Verwendung der System-Level Logical Execution Time (SL-LET) sowie der AUTOSAR Adaptive-/Classic-Plattform aufgezeigt, wie sich die Vorteile agiler Programmierung und serviceorientierter Architekturen (SOA) in Kombination mit signalbasierten Systemen nutzen lassen. Die erzielten Ergebnisse wurden in einem physischen Demonstratorsystem umgesetzt, dass die Überführung der im Rahmen von autotech.agil erzielten Resultate in die industrielle Praxis dokumentiert.

Im Rahmen der Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurde der SL-LET-Entwicklungsprozess erarbeitet und in die Design- sowie Implementierungsphasen untergliedert. In diesem Kontext wurde ein realistischer Use Case definiert und realisiert.

Die Schaeffler AG stellte hierfür die Hardware- und Softwareplattform für die mikrocontrollerbasierte AUTOSAR Classic-Umgebung bereit. Als Mikrocontroller kam ein Infineon TriCore TC39 zum Einsatz. Die AUTOSAR Classic-Umgebung wurde mittels des Software-Cluster-Konzepts in drei Cluster partitioniert. Im Host-Software-Cluster wurde das Task-System an den Use Case angepasst und gemäß dem LET-Designentwurf (D-LET) die entsprechenden Intervalle implementiert (I-LET). Darüber hinaus wurden die Cross-Cluster-Kommunikation im Host-Software-Cluster sowie der Ethernet-Stack implementiert, um die Kommunikation mit dem AUTOSAR Adaptive System zu ermöglichen.

Zur gemeinsamen Bearbeitung wurde eine Remote-Build-Plattform eingerichtet, die den Kollegen der Technischen Universität Braunschweig eine eigenständige Erstellung der Applikations-Software-Cluster ermöglichte.

Die **Vector Informatik GmbH** hat, gemeinsam mit den Projektpartnern in AP 3.3, SL-LET konsequent von der Konzeptphase bis zur prototypischen Integration in einem industrierelevanten Use-Case weiterentwickelt mit dem Ziel einer engen Kopplung von signalbasierter (AUTOSAR Classic) und service-orientierter (AUTOSAR Adaptive, ASOA) Kommunikation. Ausgangspunkt war die Analyse des technischen Stands in AUTOSAR sowie das Mapping der autotech.agil Use Cases. Hieraus wurden Anforderungen an einen praxisrelevanten Anwendungsfall – eine prädiktive Rekuperationsregelung – abgeleitet.

Darauf aufbauend wurden ein durchgängiger, AUTOSAR-konformer Entwicklungsprozess und Anforderungen an die Prototypenplattform definiert, mit Fokus auf die frühe Trennung von Design- und Integrationsmodell für LET und die Umsetzbarkeit in der Toolkette. Kundendiskussionen (u. a. Vector Timing Day, SL-LET User Group) schärften Randbedingungen und zeigten die Vorteile deterministischer Kommunikation für die Kopplung von signalbasierten und serviceorientierten Systemen. In den AUTOSAR Gremien wurde SL-LET konkretisiert und ein Modellupdate in der AUTOSAR Release R24-11 umgesetzt. Für die Adaptive Plattform wurde ein Konzeptvorschlag mit expliziter Repräsentation von SL-LET-Intervallen, API und Monitoring eingebracht.

Eine fundierte Analyse der Adaptive Plattform führte zu einer ersten Repräsentation von SL-LET für HPC-Anwendungen im MICROSAR Adaptive Stack. Als Basis dient das Vector Application Framework (VAF); ein Proof-of-Concept mit einem QNX Neutrino Betriebssystem bestätigte die Umsetzbarkeit.

Parallel entstand ein mehrstufiger Demonstrator (CP/CP sowie CP/AP), dessen Software in PREEvision als Produktlinie modelliert und einem Implementierungs-Timingmodell zugeordnet wurde. Ein End-to-End-Durchlauf im CP/AP-Setup wurde erfolgreich abgeschlossen, sowie eine Showcase-Box für die Visualisierung gemeinsam mit Partnern entworfen.

Abschließend wurden die Workflow-Erkenntnisse mit den Partnern festgehalten, Validierungs- und Transformationsregeln für das kombinierte SL-LET/LET-Modell geschaffen und die Ergebnisse für eine gemeinsame Veröffentlichung und die Abschlussdemonstration aufbereitet.

Der **Lehrstuhl Informatik 11 der RWTH Aachen** stellte in Zusammenarbeit mit dem **Institut für Datentechnik und Kommunikationsnetze der TU Braunschweig** fest, dass die Orchestrierungskonzepte von ASOA und der AUTOSAR Adaptive Plattform viele Ähnlichkeiten aufweisen. Das State Management in der Adaptive Platform als State Machine ist konzeptionell mit dem Orchestrator-Prinzip aus ASOA vergleichbar, ebenso wie die Driving Modes den Operating Modes aus ASOA entsprechen könnten. Ein wesentlicher Unterschied zeigt sich bei der Runtime-Orchestrierung: Während das ASOA-Konzept Änderungen von Dienstverbindungen zur Laufzeit vorsieht, wird dies von der AUTOSAR

Adaptive Plattform bislang nicht direkt unterstützt. Um dies zu ermöglichen, könnte das Communication Management um dynamische Inter-service-Verbindungen erweitert werden. Eine zusätzliche Abstraktionsschicht würde es erlauben, Verbindungen zwischen Diensten flexibel zur Laufzeit anzupassen. Die Steuerung solcher Anpassungen könnte dabei über das Execution Management erfolgen, welche das Communication Management parametrisiert. Im Bereich des State Management wäre zudem eine Erweiterung um einen Reconfiguration- oder RT-Integration-Schritt denkbar, sodass bei Zustandswechseln gezielt Service-Verbindungen neu konfiguriert werden können. Mit den aktuellen Funktionen der Plattform wäre dies bereits weitgehend realisierbar und würde die Grundlage für eine flexible Runtime-Orchestration schaffen.

2.3.4 AP 3.4: Werkzeuge zur diensteorientierten Softwareentwicklung

Im Arbeitspaket 3.4 wurden Fortschritte bei der modellbasierten Beschreibung, Validierung und Bewertung serviceorientierter Fahrzeugarchitekturen erzielt. Zentrale Ergebnisse sind die Weiterentwicklung des Architekturspezifikations- und Validierungstools der RWTH Aachen sowie mehrere ergänzende Werkzeuge zur KI-gestützten Analyse, Testfallgenerierung und Systembewertung. Das von der RWTH entwickelte Tool erweitert die Modellierungsumgebung aus UNICARagil und erlaubt nun eine ganzheitliche Abbildung vernetzter Fahrzeug- und Infrastrukturarchitekturen. Neben internen Fahrzeugkomponenten können auch externe Dienste modelliert werden. Durch die Integration des COVESA-VSS-Standards, die Abbildung von Degradationsszenarien und Diagnoseinformationen sowie die Einbindung von Validierungsalgorithmen wurde die Grundlage für eine konsistente und überprüfbare Architekturentwicklung geschaffen. Eine moderne Weboberfläche und ein Git-basierter Workflow fördern zudem die gemeinsame Nutzung im Projektverbund.

Ergänzend wurden von weiteren Partnern KI-gestützte Methoden und Frameworks zur automatisierten Datenanalyse und Komponentenevaluierung entwickelt. Hierzu zählen Trainings- und Bewertungsumgebungen auf Basis von Large Language Models, Active-Learning-Ansätze für effiziente Datennutzung sowie Werkzeuge zur standardisierten Qualifizierung von Softwaremodulen. Diese ermöglichen eine objektive Vergleichbarkeit von Perzeptions- und Steuerungsdiensten und eröffnen Perspektiven für wiederverwendbare, offene Softwarebausteine im automatisierten Fahren. Insgesamt wurde durch die entwickelten Tools und Architekturen eine interoperable, skalierbare und industrienahe Basis geschaffen, die sowohl Forschung als auch industrielle Weiterentwicklung in Folgeprojekten unterstützt.

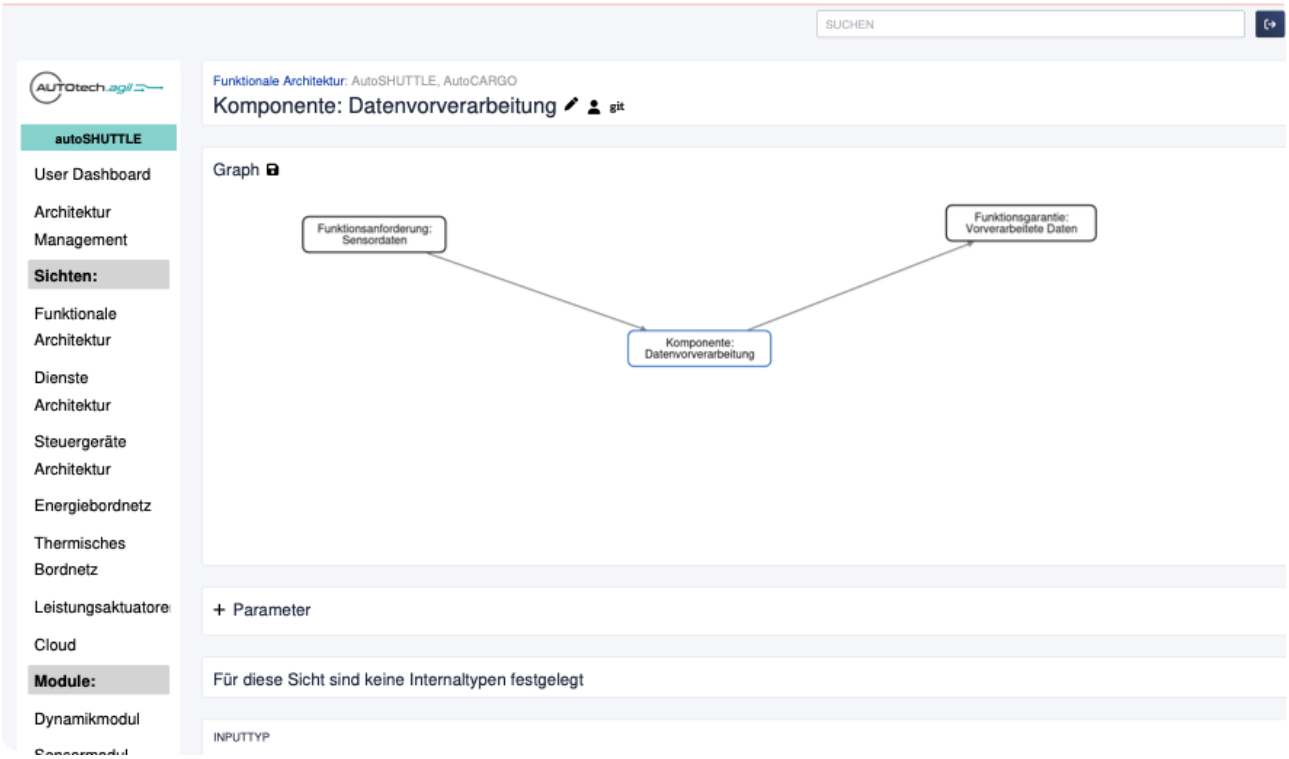


Abbildung 11: Ausschnitt des Tools zur Beschreibung und Validierung vernetzter Fahrzeug- und Infrastrukturarchitekturen, ihrer Komponenten und deren Zusammenspiel.

Beiträge der beteiligten Projektpartner:

Der **Lehrstuhl Informatik 11 der RWTH Aachen** hat ein neues Architekturspezifikations- und Validierungstool konzipiert und implementiert. Ziel der Entwicklung war es, die bestehende Modellierungsumgebung aus dem Vorgängerprojekt UNICARagil zu erweitern und an die Anforderungen der ASOA anzupassen. Das Tool ermöglicht eine umfassende Beschreibung, Analyse und Validierung von serviceorientierten Fahrzeugarchitekturen und unterstützt sowohl technische als auch organisatorische Projektpartner bei der konsistenten Spezifikation und Abstimmung der Architekturelemente.

Das Tool erlaubt nun die Modellierung unterschiedlicher Komponenten in vernetzten C-ITS-Umgebungen mit Überschneidungen zwischen Fahrzeugen und Systemen. Es können interne Fahrzeugperspektiven (Dienste, E/E-Architektur, Kommunikation) ebenso wie externe Komponenten (Infrastruktur, Cloud-Dienste) abgebildet werden. Zudem wurde der COVESA Vehicle Signal Specification (VSS)-Standard integriert, um standardisierte Fahrzeugsignale direkt verwenden zu können. Für ASOA wurde die Modellierung von Degradationsszenarien ergänzt. Der Orchestrator kann nun degradierte Zustände und Kontrakte beschreiben, inklusive spezifischer Regeln für die Degradationssteuerung. Zusätzlich können Diagnoseinformationen und Qualitätsvektoren modelliert werden, um die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit einzelner Dienste abzubilden.

Die neue Version des Werkzeugs basiert auf modernen Webtechnologien (React, Express, Node.js) und bietet deutlich verbesserte Performance, Ladezeiten und Visualisierung. Interaktive Graphdarstellungen und tabellarische Bearbeitungsansichten erleichtern die Modellpflege. Die Integration mit Git und ein „docs-as-code“-Workflow verbessern Nachvollziehbarkeit und Zusammenarbeit zwischen den Partnern.

Ein integriertes Interface-Framework ermöglicht die Einbindung von Python-basierten Validierungsalgorithmen, etwa zur Vollständigkeits- oder Konsistenzprüfung. Ergebnisse sind direkt über das Webinterface abrufbar. Das Tool wurde den Projektpartnern bereitgestellt, inklusive Importfunktion für bestehende UNICARagil-Daten, um eine nahtlose Weiterverwendung und gemeinsame Nutzung im Projekt zu ermöglichen.

Der **Lehrstuhl für Robotik, Künstliche Intelligenz und Echtzeitsysteme der TU München** hat im Rahmen des AP 3.4 eine KI-gestützte Trainingspipeline mit Hilfe von Large Language Models (LLMs) für Verkehrsvideodaten realisiert. Aufbauend auf domänenspezifischen Anforderungen wurden Methoden zur automatisierten Testdatengenerierung und Bewertung von Softwarediensten implementiert. Ein LLMs-basierter Prototyp ermöglicht dabei die sprachbasierte Analyse von Verkehrsszenen und reduziert den manuellen Aufwand bei der Testfallerstellung deutlich.

Zur Unterstützung der Datenverarbeitung wurde ein TUMTraffic Dataset Development Kit implementiert, das die Verwaltung und Erweiterung realer und synthetischer Datensätze erlaubt. Ergänzend entstand mit ActiveAnno3D ein Active-Learning-Modul, das durch entropiebasierte Szenenselektion eine effiziente Nutzung begrenzter Trainingsdaten ermöglicht. Verschiedene Modellarchitekturen wurden hinsichtlich Laufzeit und Erkennungsleistung evaluiert und in ein einheitliches Entwicklungsframework integriert. Abschließend wurde TUMTraffic-VideoQA Datensatzgenerierungspipeline (ein KI-gestütztes Softwaretool) mit einer interaktiven Benutzerschnittstelle entwickelt, das natürliche Spracheingaben mit visuellen Szenen kombiniert und eine intuitive Steuerung der Modelle erlaubt. Erste Integrationstests zeigten eine gute Skalierbarkeit sowie robuste Ergebnisse in der Szeneninterpretation.

Die **ZF Friedrichshafen AG** hatte das Ziel, die von ZF eingebrachten Anwendungsfälle als wiederverwendbare Dienste zu portieren und in die Demonstratoren zu integrieren. Hierzu wurden im Rahmen des Projektes zunächst die Anforderungen an die jeweiligen Anwendungsfälle analysiert und entsprechende Schnittstellen mit AP 2.1 abgestimmt. Daraus wurde definiert, dass die Dienste in Docker-Containern integriert werden sollen und darüber hinaus das KI-Framework „ONNX Runtime“ als Abstraktionsebene zwischen Hardware und der KI-Funktion beim Anwendungsfall Sirenenerkennung dienen soll. Dadurch wurde die Anforderung an Hardwareunabhängigkeit erfüllt und die

Portierbarkeit, unter anderem in die Cloud-Umgebung zur Anwendung der Test- und Absicherungsmethoden (AP 6.2), sichergestellt.

Darüber hinaus wurde eine Architektur unter Verwendung eines Designpatterns definiert, welche die Anwendungsfälle (Sirenenerkennung, Wellbeing und EcoControl) über definierte APIs sowie Schnittstellen in Anlehnung an Covesa-VSS in die Zielumgebung integriert. Um die partnerschaftliche Zusammenarbeit in diesem Arbeitspaket hervorzuheben, wurde das ASOA-Framework aus dem Projekt UNICARagil auf Basis definierter Anforderungen überprüft und auf Implementierbarkeit geprüft. Hieraus entstand eine Liste, die wir aus industrieller Sicht mit RWTH-i11 ausgetauscht haben. Weiterhin wurde beim Qualitätsvektorkonzept die Sicht aus der Industrie eingebracht und mit anderen Partnern (TUBS, RWTH, TUDA, TU Ulm) eine Veröffentlichung vorbereitet.

Zur Anknüpfung an vorangegangene Arbeiten wurde auch ein im Rahmen des SofDCar-Projekts implementiertes Framework (OpenVehicleAPI) hinsichtlich Anwendbarkeit in Verbindung mit dem ASOA- oder dem ROS 2-Framework analysiert. Die Anwendung der OpenVehicleAPI wurde grundsätzlich als sinnvoll angesehen, um die Standardisierung zu vertiefen, war aber zeitlich nicht umsetzbar und für die Projektzielerreichung nicht zwingend erforderlich.

Darüber hinaus wurde das Konzept aus AP 3.4 in einer AUTOSAR-Adaptive-Umgebung implementiert und Open-Source-Werkzeuge auf ihre Anwendbarkeit überprüft. Dabei wurde die EcoControl-Funktion als Service in ROS 2 und AUTOSAR Adaptive integriert und die Ergebnisse des PoCs im Rahmen der ELIV-Konferenz 2025 veröffentlicht. Die zuvor beschriebenen Arbeiten waren notwendig, um die Ziele und die Verwendung der Ergebnisse nach dem Projekt zu ermöglichen. Das entstandene Wissen kann in den Folgeprojekten wie HAL4SDV und Shift2SDV weitergenutzt werden. Die Anwendungsfälle wurden erfolgreich in das Zielsystem integriert und auf der Abschlussdemo der Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

Die **Thinking Cars GmbH** entwickelte in AP 3.4 ein Bewertungs-, Qualifizierungs- und Kollaborationswerkzeug für funktionale Komponenten eines automatisierten Fahrsystems. Entsprechende Schnittstellen zur autotech.agil Gesamtarchitektur wurden durch ein generalisierbares Adaptionsmodell realisiert. Die Vergleichbarkeit verschiedener Softwaremodule wurde durch eine umfangreiche Ontologie sichergestellt, die eine Evaluation verschiedener Perzeptionsmodelle (verschiedene Ansätze, verschiedene Sensormodalitäten) auf diversen offenen oder proprietären Datensätzen ermöglicht. Das geschaffene Framework ermöglicht die transparente Bewertung der Module mittels bekannter Metriken, Benchmarks und einem einheitlichen TC-Scoring, das eine übergreifende Vergleichbarkeit schafft. Die Entwicklung wurde auf einem im Projekt angeschafften Server realisiert, wobei die Skalierbarkeit über Cloud-Systeme in der Implementierung berücksichtigt und getestet wurde.

Ein Prototyp der Plattform wurde auf dem Abschlussevents des Projekts vorgestellt. Durch die skalierbar umgesetzte Architektur können viele Softwaremodule in kurzer Zeit hinzugefügt werden und mittels moderner KI-Methoden kompatibel gemacht werden. Eine Erweiterung auf szenariobasierte Ansätze zur Bewertung vollständiger Systemketten oder End-2-End Systeme wurde in der Architektur bereits vorgesehen. Die (Zwischen-)Ergebnisse wurden während der Projektlaufzeit an verschiedenen Stellen öffentlich präsentiert (u.a. Aachen Colloquium, ELIV, Mobility Innovation Week Japan, VDI FAS Tagung). Diverse Gespräche mit Vertretern aus Industrie zeigten Interesse an dem Ansatz und bestätigten das Potenzial der Qualifizierung von open-source Softwarebausteinen für das automatisierte Fahren.

2.4 Haupt-AP 4: Funktionale Software zur Fahrzeugautomatisierung

2.4.1 AP 4.1: Robuste, integere und selbstbewertende Lokalisierung im urbanen Umfeld

Das AP 4.1 (Robuste, integere und selbstbewertende Lokalisierung im urbanen Umfeld) verfolgte das Ziel, die bestehenden GNSS-Lücken in urbanen Gebieten zu schließen und die Qualität der Lokalisierung durch eine integrierte Selbstbewertung transparent und verständlich darzustellen. Aufbauend auf den Lokalisierungsmodulen aus UNICAR*agil*, die GNSS, IMU und Odometrie beinhalteten, wurde eine neue robuste Lokalisierung durch Erweiterung um komplementäre Sensoren (LiDAR und Stereokamera) entwickelt. Im Fokus stand dabei die Erhöhung der Robustheit und Integrität der Lokalisierung. Die Selbstbewertung führt zur realistischen Quantifizierung der Lokalisierungsintegrität auf Basis eines redundanten Sensorsystems und stellt die Vertrauenswürdigkeit der Lokalisierung für nachgelagerte Funktionen verständlich dar.



Abbildung 12: Sensor-Setup zur Lokalisierung in autotech.agil auf dem Demo-Fahrzeug von TUDA-PSGD.

Beiträge der beteiligten Projektpartner:

Die **Arbeitsgruppe Physikalische Geodäsie und Satellitengeodäsie der TU Darmstadt** hat im AP 4.1 zentrale Beiträge zur Weiterentwicklung eines Lokalisierungssystems für urbane Szenarien geleistet. Das bestehende Lokalisierungsmodul aus dem Vorgängerprojekt UNICARagil wurde erfolgreich an die neue Sensorplattform angepasst und modular erweitert. Es unterstützt Echtzeitbetrieb, Simulation und Postprozessierung und kann flexibel in verschiedenen Entwicklungs- und Validierungsszenarien eingesetzt werden.

Zur Schließung von GNSS-Lücken wurden verschiedene visuelle und radiobasierte Technologien untersucht. Radiobasierte Ansätze – terrestrisch wie satellitengebunden – erfüllten jedoch zu Projektbeginn noch nicht die technischen Anforderungen für eine Verwendung in autotech.agil. Daher wurden die komplementären Sensoren Stereokamera und LiDAR von Projektpartnern übernommen und erfolgreich in das Lokalisierungssystem integriert. Ihre Einbindung verbesserte die Positionsbestimmung in komplexen urbanen Szenarien deutlich.

Ein Schwerpunkt lag auf der Entwicklung realistischer Qualitäts- und Integritätsbewertungen. Methoden zur adaptiven stochastischen Modellierung (ASM) ermöglichen eine kontextabhängige Analyse der Sensordaten und eine dynamische

Abschätzung der Genauigkeit. Dies ermöglicht die adaptive Anpassung der stochastischen Modelle in der Sensordatenfusion zur Schätzung der Lokalisierungsparameter. Darauf aufbauend wurde ein erweitertes Konzept zur Selbstbewertung (ESB) entwickelt, das neben Genauigkeit auch Verfügbarkeit und Konsistenz berücksichtigt und als Maß für das Vertrauen in die Lokalisierung dient.

Eine Monitoring- und Entscheidungslogik bewertet und gewichtet redundante Lokalisierungslösungen für die finale Ausgabe des Lokalisierungsmoduls. Das entwickelte Verfahren wurde auf einer Simulations- und Validierungsplattform optimiert und anhand erster Messdaten unter realen Bedingungen validiert. Ein Demonstrator zeigt die Leistungsfähigkeit des Systems in urbanen Szenarien und wurde im Rahmen eines Abschlussevents präsentiert.

Die **iMAR Navigation GmbH** entwickelte im Rahmen des Projekts eine LiDAR-gestützte Erweiterung klassischer INS/GNSS-Lokalisierungssysteme, um auch in Szenarien mit eingeschränkter oder vollständig fehlender Satellitensichtbarkeit eine robuste, hochpräzise und kontinuierliche Positionsbestimmung zu gewährleisten. Durch die Integration von Umgebungsinformationen aus LiDAR-Messdaten in die inertialbasierten Navigationslösungen kann die systembedingte Drift klassischer INS-Systeme effektiv kompensiert und die Gesamtgenauigkeit der Positionierung in bekannten und unbekannten Umgebungen signifikant verbessert werden.

Zur Realisierung dieser Methode kamen faktorgraphbasierte Sensordatenfusionsansätze zum Einsatz, die eine probabilistische Verknüpfung heterogener Messdatenquellen ermöglichen und eine konsistente Schätzung des Fahrzeugzustands auch über längere GNSS-Ausfallstrecken hinweg erlauben. Die entwickelte Lösung wurde im Rahmen des Abschlussevents erfolgreich auf dem gemeinsamen Versuchsträger integriert und demonstriert, wobei eine deutliche Steigerung der Lokalisierungsrobustheit und -genauigkeit unter realitätsnahen Einsatzbedingungen nachgewiesen werden konnte.

Hierfür wurde eine modular aufgebaute, vollständig im Hause iMAR entwickelte und gefertigte Sensorplattform konzipiert und implementiert. Diese umfasst ein hochauflösendes LiDAR-System, eine inertiale Messeinheit (IMU), ein GNSS-Modul sowie ein Kamerasystem des AP-Partners zur ergänzenden Umfelderfassung. Ergänzend wurde die Plattform mit einer hochpräzisen Referenzmesstechnik ausgestattet, die auf dem Versuchsträger integriert wurde, um eine Ground-Truth-Trajektorie mit Zentimetergenauigkeit bereitzustellen. Auf dieser Grundlage konnten im Rahmen umfangreicher gemeinsamer Messkampagnen über eine Vielzahl relevanter Verkehrsszenarien hinweg umfangreiche Datensätze generiert werden. Diese dienten nicht nur der Evaluierung und Validierung der entwickelten Lokalisierungsalgorithmen, sondern ermöglichten auch eine systematische Analyse ihrer Leistungsfähigkeit sowie deren iterative Weiterentwicklung.

Das **Institut für Mess- und Regelungstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie** hat im Arbeitspaket 4.1 eine eigenständige visuelle Messplattform entwickelt, die sich mit den Messplattformen der Partner kombinieren lässt. Besonderes Augenmerk lag darauf, dass sie die Rechenleistungen bereitstellen kann, die für Deep-Learning-Ansätze erforderlich sind. Die bestehende visuelle Lokalisierungspipeline wurde an das neue Sensorsetup angepasst und entsprechend optimiert.

Mit der aufgebauten visuellen Messplattform wurden Datensätze unter verschiedenen Sichtbedingungen aufgezeichnet und analysiert. Als Schwachstelle der visuellen Lokalisierung wurde die Detektion und Deskription von Landmarken identifiziert. Zur Verbesserung dieser wurde ein Deep-Learning-Ansatz gewählt, der Landmarken gleichzeitig detektieren und beschreiben kann. Die erlernte Detektion und Deskription der Landmarken wurde in die visuelle Lokalisierungspipeline integriert und hinsichtlich Echtzeitfähigkeit und Speichereffizienz optimiert. Der trainierte Detektor erkennt automatisch geblendete oder durch Regentropfen verzerrte Bildbereiche, ignoriert diese und ist so robuster gegenüber schlechten Sichtbedingungen. Des Weiteren vergibt er für jede Landmarke einen Konfidenzwert, der eine gezielte Auswahl der robustesten Landmarken ermöglicht (Landmarkenauswahlstrategie).

Zur Validierung und Integration wurde die entwickelte visuelle Lokalisierung im Rahmen von Messfahrten gemeinsam mit der GNSS/LiDAR-Plattform der iMAR Navigation GmbH getestet. Zur Veranschaulichung der Ergebnisse wurde eine Visualisierung implementiert. Die kombinierte Lokalisierungslösung wurde in der finalen Abschlussdemonstration auf dem Versuchsfahrzeug der TU Darmstadt erfolgreich präsentiert.

Das **Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt** hat die Anforderungen an die Lokalisierung aus Sicht der Fahrdynamik- und Trajektorienregelung abgeleitet und eine entsprechende Schnittstelle konzipiert. Diese wurde in der Simulationsumgebung CarMaker erfolgreich integriert.

2.4.2 AP 4.2: Selbstbewertende und situationsabhängige Umgebungswahrnehmung

Das AP 4.2 umfasste Arbeiten an der Umgebungserfassung automatisierter Fahrzeuge. Dabei standen vor allem die Erhöhung von Robustheit und Effizienz (hinsichtlich der notwendigen Rechenressourcen) sowie die Einbettung in das projektübergreifende Selbstbewertungs-Framework anhand der Qualitätsvektoren im Fokus. Neben einem allgemeinen Konzept zur situationsabhängigen Perzeption wurden die Verarbeitung von Kamera- und Lidardaten adressiert. Während bei den Kameradaten die Verbesserung der Robustheit des zugehörigen Detektor-Services im Fokus stand, lag der Schwerpunkt bei der Lidardatenverarbeitung in der Erhöhung der Ressourceneffizienz durch eine selektive Verarbeitung nur der für die aktuelle Verkehrssituation relevanten Sichtbereiche (vgl. Abbildung 13). Das übergeordnete Konzept zur situationsabhängigen Perzeption nutzt dabei neben Informationen über die aktuelle verkehrliche Situation und der geplanten Route auch Rückmeldungen der in der Perzeptionskette eingesetzten Services über deren aktuellen Zustand aus dem Qualitätsvektor, um so bei Bedarf zur Weiterfahrt die Perzeptionskette zu rekonfigurieren, falls die aktuelle Situation nicht zur aktuellen Fähigkeit der Perzeptionskette passt.

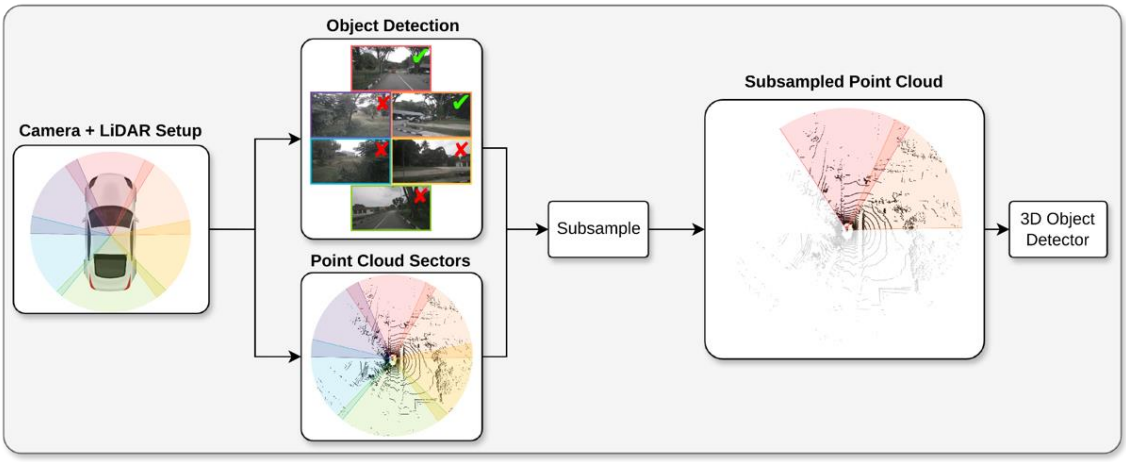


Abbildung 13: Überblick über die Arbeitsweise des situationsabhängigen Lidar-Detektors, der Daten nur in relevanten Sektoren auswertet.[1]

Beiträge der beteiligten Projektpartner:

Das **Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik der Universität Ulm** hat sich im Rahmen von AP 4.2 mit dem Problem der effizienten, situationsbewertenden Umgebungswahrnehmung befasst. Hierfür wurden zwei neue Konzepte entwickelt. Ein Konzept bestand darin, die Umgebung in Raster zu unterteilen und zu bewerten, ob diese für die aktuelle Situation relevant oder irrelevant sind. Die Perzeption kann dann auf die relevanten Bereiche konzentriert werden. Das entwickelte Konzept basiert auf einer sogenannten Multi-Layer-Attention-Map (MLAM). Die MLAM kombiniert verschiedene situative Einflüsse, basierend auf z. B. Karteninformationen, Fahrzeugdynamik oder Perzeptionsdaten. Die MLAM kann dann von nachfolgenden Services verwendet werden, um die entsprechende optimale Systemkonfiguration zu finden, in welcher Ressourcen regional fokussiert werden können, z.B. durch Entfernen von Daten aus irrelevanten Regionen. Basierend auf einer MLAM kann z. B. die Systemkonfiguration für strukturierte und unstrukturierte Umgebungen angepasst werden.

Das zweite entwickelte Konzept dient der automatischen Konfiguration von Lidar-Detektoren zur Ressourceneinsparung. Hierfür wird das 360° Sichtfeld eines Lidars in separate Polarsektoren aufgeteilt. Das Hauptziel

[1] Schön, M.; Kösel, M.; Dietmayer, K. and Buchholz, M.: “Towards Efficient LiDAR-Based Perception in Autonomous Driving: Exploiting Point Cloud Sub-sampling and Camera-based Prior Knowledge.” In: *16. Uni-DAS e.V. Workshop Fahrerassistenz und automatisiertes Fahren*, 2025. Online: https://www.uni-das.de/images/pdf/fas-workshop/2025/FAS2025-02-Schoen.pdf.

besteht darin, nur relevante Polarsektoren basierend auf Vorwissen auszuwählen, um nicht die gesamte Punktwolke verarbeiten zu müssen. Das Vorwissen kommt hierbei aus Kameradetektionen. Ein Polarsegment wird nur dann verwendet, wenn die Kamera ein relevantes Objekt innerhalb des Polarsegments erkannt hat. Dies führt zu einer kleineren Gesamtpunktwolke, die das Lidar-Wahrnehmungsmodul verarbeiten muss.

Das **Institut für Mess- und Regelungstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie** hat sich mit der Entwicklung von Methoden für die Selbstbewertung der Umfeldwahrnehmung für automatisierte Fahrzeuge befasst. Ein zentraler Forschungsschwerpunkt lag hierbei auf der kamerabasierten Perzeption, insbesondere unter schwierigen Sichtbedingungen.

Hierzu wurden die Auswirkungen schwieriger Sichtbedingungen als eine Verschiebung zwischen Trainings- und Testdomäne analysiert. Da die Leistungsfähigkeit der kamerabasierten Umfeldwahrnehmung unter schlechten Sichtbedingungen signifikant abnimmt, wurde zunächst die Performanz von Standard-Perzeptionsverfahren analysiert, wobei die Objekterkennung beispielhaft im Fokus stand. Anschließend wurden Methoden zur domänenadaptiven Objekterkennung evaluiert, um deren Eignung für Wetter- und Lichtbedingungen wie Dunkelheit, Blendung, Regen oder Nebel zu bewerten. Darauf aufbauend wurden neuartige Methoden zur Domänenadaption entwickelt. Ziel dieser neuen Ansätze ist es, die Perzeptionsleistung von kamerabasierten Algorithmen auf Zieldomänen mit schlechter Sicht signifikant zu verbessern.

Ein weiterer Kernaspekt der neuen Verfahren ist eine integrierte Selbstbewertung. Diese wird durch mehrstufige Qualitätsvektoren realisiert, die in den einzelnen Phasen der Perzeptionskette (Einzelsensor, Fusion, Tracking) generiert werden. Diese Vektoren wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik der Universität Ulm integriert und liefern verschiedene Kennzahlen zur Existenzwahrscheinlichkeit, Klassifizierung und Position erkannter Objekte. Die Ergebnisse dieser Selbstbewertung können von weiteren Modulen in der Verarbeitungskette genutzt werden.

2.4.3 AP 4.3: Robuste Planung und Regelung durch probabilistische Verfahren

In AP 4.3 wurde eine methodische probabilistische Trajektorienplanung und -regelung entwickelt und erfolgreich umgesetzt, wodurch die probabilistische Sicherheitsbetrachtung vom Sensor bis zum Aktor vervollständigt werden konnte. Dabei wurden zentrale Schnittstellen zu Aktorik und Sensorik systematisch berücksichtigt, sodass die Planung und Regelung in eingebetteten Systemen funktionsfähig integriert werden können. Zentrale Komponenten sind ein handhabbares Ego-Fahrzeugmodell und ein Modell zur Vorhersage der Dynamik der Umgebung. Unsicherheiten, insbesondere durch das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer, wurden durch multimodale, probabilistische Vorhersagen adressiert. Die Planung erfolgt optimierungsbasiert unter Berücksichtigung der Fahrzeugdynamik, Aktorenbeschränkungen und Kontextwissen.

Die Qualität der KI-basierten Vorhersage der Umgebungsdynamik wurde über einen funktionsspezifischen Qualitätsvektor systematisch bewertet und im Rahmen eines systemischen Selbstbewusstseins zur Absicherung des Subsystems berücksichtigt. Zusätzlich wurden konzeptionelle Herausforderungen hinsichtlich Anpassbarkeit, Skalierbarkeit sowie ethischer und kultureller Einflüsse berücksichtigt.

Die modellprädiktive Regelung berechnet Trajektorien unter Einhaltung der Systemdynamik und nutzt einen modellbasierten Beobachter zur Rekonstruktion nicht messbarer Zustände sowie zur Berücksichtigung stochastischer Unsicherheiten. Durch die enge Integration von Planung und Regelung können Inkonsistenzen aufgrund unterschiedlicher Modellgrundlagen vermieden werden.

Damit wurden alle definierten Ziele erreicht: die methodische Umsetzung der probabilistischen Planung und Regelung, die Berücksichtigung relevanter Schnittstellen sowie die systematische Bewertung der Vorhersagequalität mittels Qualitätsvektor. Gleichzeitig wurden weiterführende Fragestellungen identifiziert, die Anknüpfungspunkte für zukünftige Forschung darstellen.



Abbildung 14: Visualisierung der robusten Planung und Regelung durch probabilistische Verfahren.

Beiträge der beteiligten Projektpartner:

Der **Lehrstuhl für Regelungstechnik der FAU Erlangen-Nürnberg** hat im Rahmen von AP 4.3 ein Konzept für die probabilistische Planung entwickelt. In diesem Zusammenhang wurden zentrale Fragestellungen der Schnittstellen partnerschaftlich diskutiert und abschließend definiert. Darüber hinaus wurden Aspekte der Absicherung, die sich durch den zunehmenden Einsatz von KI ergeben, aufgegriffen. Diese wurden im Rahmen eines systemischen „Selbstbewusstseins“ umgesetzt, sodass die Qualität des Sub-systems adaptiv bewertet wird und somit ein funktionsspezifisches Beispiel des Qualitätsvektors repräsentiert.

Im Zentrum der Tätigkeiten stand die Entwicklung einer probabilistischen und robusten Planung. Zentrale Elemente sind hierbei ein präzises, zugleich handhabbares Fahrzeugmodell, auch Ego-Modell genannt, sowie ein Modell zur Vorhersage der Dynamik der Umgebung. Aufbauend auf diesen Kernkomponenten erfolgt die Optimierungs-basierte Planung. Im Rahmen des Projekts konnten Beiträge in allen drei Bereichen geleistet werden. Im Bereich des Ego-Modells wurde gezeigt, wie mittels Meta-Learning die Gierratendynamik und damit das Fahrzeugmodell über unterschiedliche Operational Design Domains sowie wechselnde Wetter- und Nutzungsbedingungen hinweg robustifiziert werden kann. Wesentliche Quellen von Unsicherheiten ergeben sich jedoch aus dem Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer, was durch multimodale, probabilistische Vorhersagen auf Basis datengetriebener statistischer Modelle adressiert wurde. In diesem Zusammenhang konnte zudem ein Beitrag zur Untersuchung der Übertragbarkeit geleistet werden. Auch im Bereich der Planung selbst, insbesondere bei der sampling-basierten Planung, wurde der Einfluss von Kontextwissen untersucht und dessen positive Wirkung nachgewiesen.

Aufgrund der zunehmenden Verwendung von künstlicher Intelligenz in der Planung wurde das Thema Absicherung aufgegriffen, um einen praxisrelevanten Beitrag leisten zu können. Dabei wurde der aktuelle Stand der Technik aus Forschung, Standardisierung und Regulierung berücksichtigt. Darauf aufbauend konnte eine neue Methodik entwickelt und exemplarisch im Kontext des systemischen Selbstbewusstseins untersucht werden. Darüber hinaus wurden konzeptionell weitere Herausforderungen im Hinblick auf Anpassbarkeit und Skalierbarkeit adressiert, wobei auch ethische und kulturelle Einflüsse berücksichtigt wurden.

Damit konnten die definierten Ziele erreicht werden. Gleichzeitig wurden weiterführende Fragestellungen identifiziert und zukünftige Herausforderungen aufgezeigt, die einen zentralen Anknüpfungspunkt für nachfolgende Forschung darstellen.

Das **Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik der Universität Ulm** hatte in diesem Arbeitspaket überwiegend unterstützende Funktion für die Arbeiten der weiteren Projektpartner, um die Anbindung der Planungs- und Regelungsverfahren an die Perzeption sicherzustellen und eventuelle Anforderungen an die Perzeptionskette in AP 4.2 mitnehmen zu können. Zudem bestand insbesondere mit dem Partner FAU ein intensiver Austausch zum Einsatz künstlicher Intelligenz im automatisierten Fahren, der zu mehreren gemeinsamen Publikationen unter Federführung des Partners FAU geführt hat.

Die **Robert Bosch GmbH** hat eine umfassende, komponentenübergreifende Regelung für die Fahrzeugführung entwickelt und validiert. Zunächst wurden die Schnittstellen der Regelung zu Lokalisierung, Perzeption, Pfad-/Trajektorienplanung und Aktuatoren definiert.

Kernstück der Entwicklung ist ein modellprädiktives Regelungskonzept. Dieses formuliert das Regelungsproblem als Optimalsteuerungsproblem, bei dem das zukünftige Fahrzeugverhalten basierend auf einem Fahrzeugmodell und der Fahrzeugposition vorhergesagt wird. Die Eingangssequenz wird unter Berücksichtigung einer Kostenfunktion optimiert, wobei der erste Eintrag iterativ dem System übergeben wird. Die modellprädiktive Regelung kann Systemdynamiken und Beschränkungen der Aktuatoren systematisch behandeln. Ergänzend wurde ein Optimierungsproblem eingeführt, um detaillierte Trajektorien zu berechnen, die den vorgegebenen Pfad unter Einhaltung der Systemdynamik abbilden und in die Regelung integriert werden.

Das entwickelte Regelungskonzept wurde in einer detaillierten Simulationsumgebung umfassend getestet. Hierbei zeigten sich in typischen Szenarien wie Doppelspurwechseln und Kurvenfahrten vielversprechende Ergebnisse. Identifizierte modellfehlerbedingte Beschränkungsverletzungen konnten durch den Einsatz weicher Nebenbedingungen erfolgreich reduziert werden.

Zur Erhöhung der Praxistauglichkeit wurde die Regelung um eine Ausgangsrückführung erweitert. Ein modellbasierter Beobachter rekonstruiert nicht messbare Systemzustände und integriert verfügbare Messungen, wodurch auch stochastische Unsicherheiten berücksichtigt werden können. Die Integration und der Test des Filters in der Simulation waren erfolgreich.

Schließlich wurde ein Konzept zur Integration der Trajektorienplanung und der Regelung entwickelt. Dieses ermöglicht es der Trajektorienplanung, das Verhalten der Regelung zu antizipieren, um Inkonsistenzen aufgrund unterschiedlicher Modellgrundlagen zu vermeiden.

2.4.4 AP 4.4: Methoden für automatisierte Niedriggeschwindigkeitsfunktionen

Das AP 4.4 umfasste die Erforschung von Methoden zur systematischen Entwicklung von Niedriggeschwindigkeitsfunktionen des automatisierten Fahrens als Erweiterung des im Forschungsprojekt UNICARagil entwickelten Konzepts des sicheren Anhaltens. Die dabei entwickelten Methoden zielten auf den gesamten Funktionsentwicklungsprozess (Anforderungen, Konzept, Implementierung, Testen) ab. Basierend auf den entwickelten Methoden wurde eine exemplarische Entwicklung einer Niedriggeschwindigkeitsfunktion durchgeführt und im Rahmen der Abschlussveranstaltung des Projekts demonstriert.

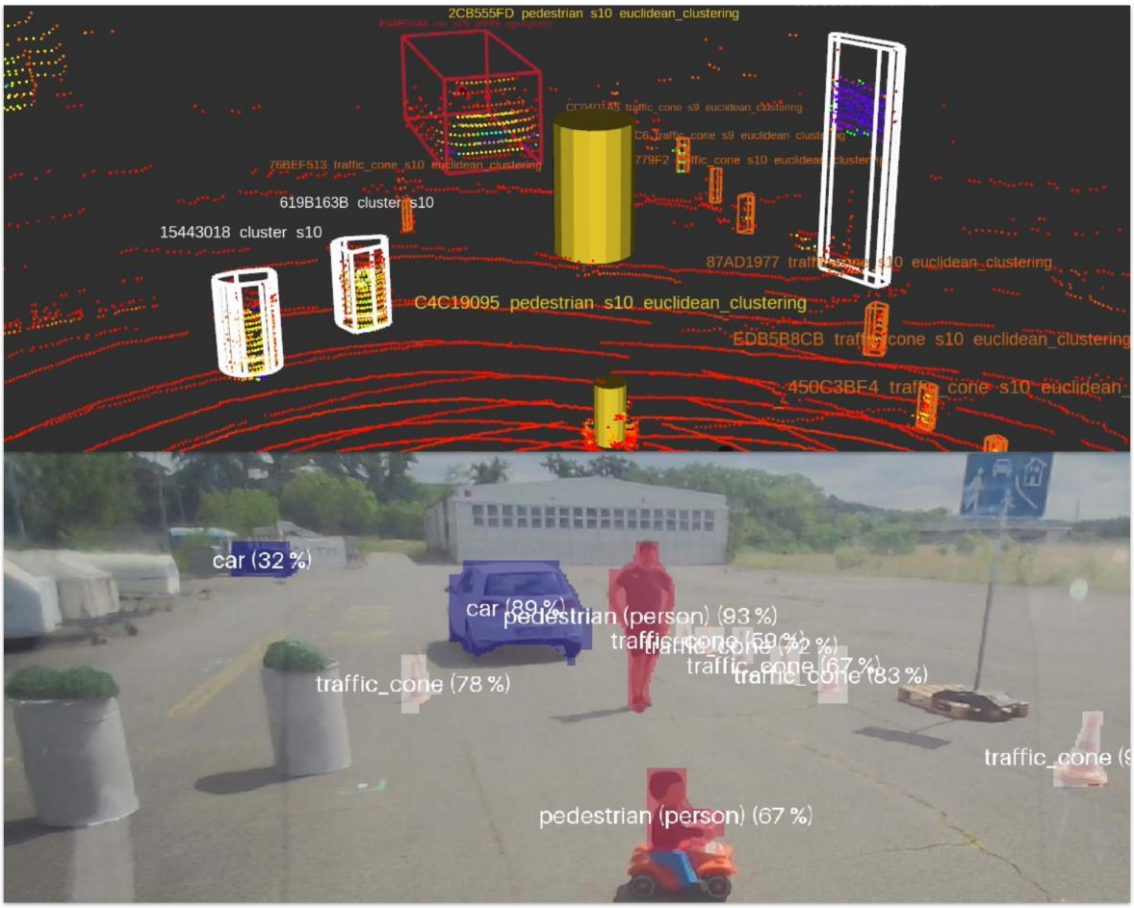


Abbildung 15: Umfelderfassung eines herausfordernden Szenarios durch das in AP 4.4 konzeptionierte und applizierte Nahbereichssensor-Setup der exemplarisch entwickelten Niedriggeschwindigkeitsfunktion.

Beiträge der beteiligten Projektpartner:

Das **Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt** war als alleiniger Projektpartner für die Umsetzung des AP 4.4 zuständig.

Im Rahmen der Arbeiten wurden wesentliche Erkenntnisse der Sicherheitsfunktion „Sicheres Anhalten“ aus dem Projekt UNICAR*agil* auf neue Anwendungsfälle im Niedriggeschwindigkeitsbereich übertragen. Eine vereinfachte Simulationsumgebung diente als Grundlage für die Ableitung von Anforderungen in frühen Entwicklungsphasen. Darauf aufbauend erfolgte eine umfassende Analyse und Klassifizierung von Use-Cases von Niedriggeschwindigkeitsanwendungen des automatisierten Fahrens. Diese Analyse ermöglichte die Definition technischer und sicherheitsrelevanter Anforderungen sowie die Herausarbeitung von Potenzialen für Synergien über verschiedenartige Niedriggeschwindigkeitsanwendungen hinweg.

Zur Umsetzung einer exemplarischen Niedriggeschwindigkeitsfunktion wurden Konzepte für funktionale Systemarchitekturen entwickelt. Als Basis für die Implementierung wurden prototypische Komponenten zur Trajektorienplanung, Karten-Vorverarbeitung und ein spezialisiertes Nahbereichs-Sensor-Setup entwickelt. Die

dazugehörige Referenzarchitektur wurde in einem Software-Framework auf Basis von ROS 2 implementiert, mit Schnittstellen zu CarMaker und ASOA, und sowohl in Simulationen als auch im Prototypenfahrzeug autoELF erprobt.

Die exemplarische Niedriggeschwindigkeitsfunktion wurde vollständig umgesetzt, appliziert und in kritischen Szenarien (z.B. schnelle Detektion eines spielenden Kinds) getestet. Neben Software-in-the-Loop-Analysen fanden die Erprobungen auf verschiedenen Testgeländen statt, die die Funktionsfähigkeit und Sicherheit der exemplarischen Niedriggeschwindigkeitsfunktion bestätigten. Die Funktion wurde auf der Abschlussveranstaltung am 11.09.2025 einem breiten Publikum demonstriert.

Begleitend wurde eine methodische Vorgehensweise zur Ableitung funktionaler Szenarien entwickelt und international veröffentlicht. Ergänzt durch weitere wissenschaftliche Publikationen zur Use-Case-Analyse im Niedriggeschwindigkeitsbereich sowie zu einer prototypisch implementierten Planungskomponente leisten die Ergebnisse einen Beitrag zur beschleunigten Entwicklung, Absicherung und Einführung automatisierter Fahrfunktionen im Niedriggeschwindigkeitsbereich.

2.5 Haupt-AP 5: Lernende vernetzte Verkehrsintelligenz

2.5.1 AP 5.1: Leitzentrale zur sicheren Koordination von Leitwartenverbünden

Zunächst wurde eine Anforderungsanalyse der Leitwartenverbundstruktur durchgeführt. Dabei wurden die Aufgaben und Anforderungen der Leitzentrale sowohl durch Literaturrecherche als auch durch Experteninterviews definiert, unter anderem mit der automatisierten U-Bahn Nürnberg, der Verkehrsleitzentrale München sowie New Mobility Solutions Hamburg.

Auf Grundlage der Anforderungsanalyse wurde der Informationsaustausch der Leitzentrale modelliert. Dabei wurden beispielhaft Prozesse und Tests innerhalb einer Simulationsumgebung erprobt, um weitere Handlungsempfehlungen abzuleiten. Die Kommunikation basiert auf den ETSI-ITS-Nachrichten. Sämtliche Kommunikation mit der Leitzentrale – sowohl eingehend als auch ausgehend – wurde unabhängig vom Sender bzw. Empfänger (Leitwarten, V2X-Fahrzeuge, intelligente Infrastruktur) einheitlich gestaltet.

Die Softwarearchitektur ist webbasiert: Das Frontend wurde mit Angular und TypeScript umgesetzt, das Backend in Python. Die Echtzeitkommunikation zwischen beiden Komponenten erfolgt über WebSockets.

Der Prototyp umfasst drei Ansichten:

- Kanban-Ansicht: Verwaltung neuer, aktiver und inaktiver Ereignisse, die das Verkehrssystem beeinflussen.
- Zentrale Ansicht: Übersicht über das Verkehrssystem mit Fahrzeugpositionen, Zuständen und Ereignissen. Die Karte unterstützt HD-, OSM- und Satellitendarstellungen.
- Detailansicht: Zugriff auf fahrzeugspezifische Daten und Kamerastreams.

Der hoheitliche Eingriff durch die Leitzentrale sowie die Interaktion mit anderen Fahrzeugen und der „Infobiene“ wurden im Rahmen der Abschlussdemonstration anhand eines Einsatzszenarios gezeigt.

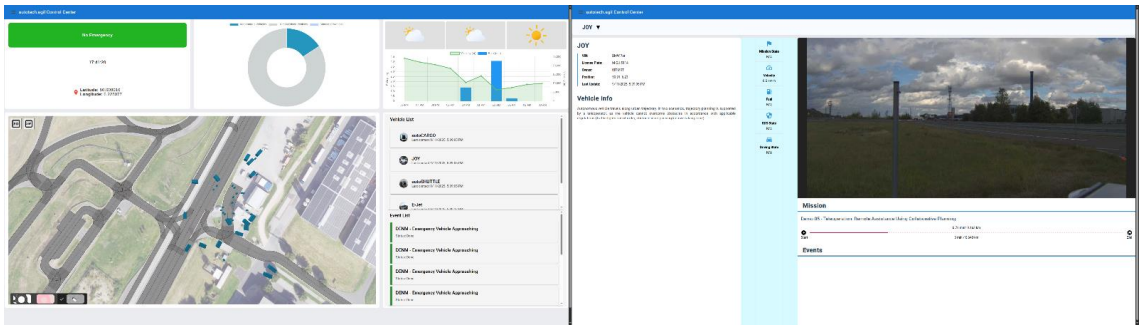


Abbildung 16: Screenshots von der zentralen Ansicht und der Detailansicht der Leitzentrale während des Einsatzszenarios

Beiträge der beteiligten Projektpartner:

Der **Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der TU München** war als einziger Partner an diesem AP beteiligt.

2.5.2 AP 5.2: Digitaler Zwilling & Kollektive Funktionalitäten

Das AP 5.2 umfasste die Konzeption und Umsetzung digitaler Live-Zwillinge sowie simulativer Zwillinge als Bausteine einer diensteorientierten, modularen Gesamtsystemarchitektur. Ziel war eine lernfähige, vernetzte Verkehrsintelligenz, die Daten, Rechenressourcen und Funktionen bedarfsgerecht bereitstellt und kontinuierliche Selbstanalyse, Simulation und Verbesserung ermöglicht.

Es wurden Schnittstellen harmonisiert, Sensor- und Fahrzeugdaten dienstebasiert angebunden und ein digitaler Zwilling prototypisch realisiert, visualisiert und einer Leitwarte zur Verfügung gestellt. Die Verlässlichkeit wurde durch bessere Datenverarbeitung und Fusion gesteigert; mobile fliegende Sensorik wurde integriert und kann aus der Cloud gezielt zur Schließung blinder Flecken eingesetzt werden. Für Entwicklung und Test entstand ein parametrierbarer simulativer Zwilling. Ergänzend wurde neuromorphe Sensorik konzipiert und prototypisch integriert, multimodale Daten aufbereitet und Software für eine kooperative Wahrnehmung realisiert. Für kollektive Funktionen wurden Regeln zur Identifikation lernrelevanter Daten, kurz- und langfristige Datenspeicher sowie Schnittstellen zwischen Fahrzeugen, Infrastruktur und Offboard-Systemen umgesetzt. Eine MLOps/DevOps-Kette mit Datenversionierung, Experiment-Tracking, CI/automatisierten Tests, und Deployment bildet die Basis für Software-Updates einschließlich updatefähiger KI-Module.

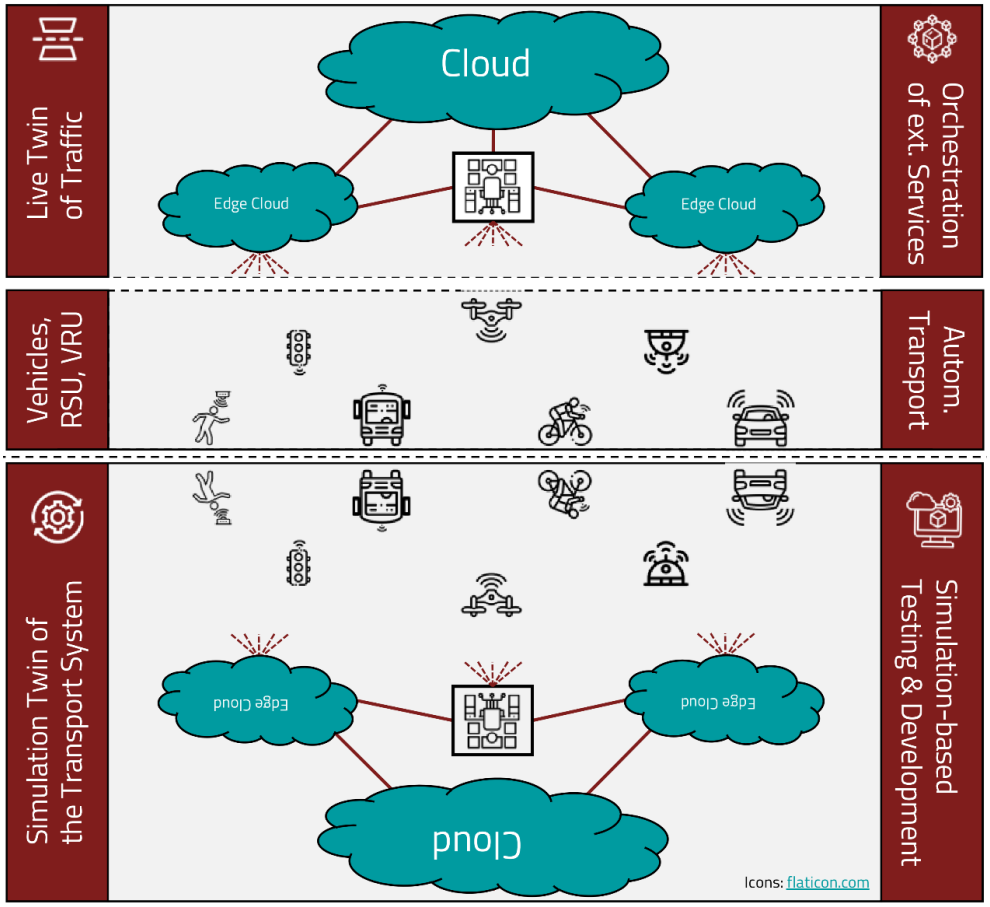


Abbildung 17: Das Verkehrssystem besteht aus automatisierten oder teilautomatisierten Agenten und externen Elementen wie Roadside-Units, Cloud-Servern, Kontrollräumen und Kontrollzentren. Die externen Elemente berechnen, nutzen und stellen einen Live- Digitalzwilling bereit, der eine digitale Darstellung des Verkehrs ist. Ein Simulationszwilling ist ein digitaler Spiegel des gesamten Verkehrssystems einschließlich der externen Elemente.

Beiträge der beteiligten Projektpartner:

Das **Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen** hat alle vorgesehenen Beiträge im Arbeitspaket Digitaler Zwilling & Kollektive Funktionalitäten erfolgreich umgesetzt. Gemeinsam mit den Partnern wurden Schnittstellen zwischen Infrastruktur, Fahrzeugen und Digitalem Zwilling definiert und eine diensteorientierte Anbindung der Daten implementiert. Das ika entwickelte bedarfs- und diensteorientierte Verarbeitungsketten, updatefähige Module zur Einbindung in den Live-Zwilling sowie eine generische Continuous Integration Pipeline zur Erstellung von Container-Laufzeitumgebungen; zudem wurden Visualisierungswerkzeuge bereitgestellt. Das ika lieferte Fusionsmodule, und Methoden zur Unsicherheitsbestimmung. Die Funktionsmodule wurden in den Live-Zwilling integriert. Für die simulationsgestützte Entwicklung stellte das ika Datenschnittstellen zur Verbindung von Fahrzeug- und Infrastrukturfunktionen mit dem simulativen Zwilling bereit. Im Kontext kollektiver Funktionen wurden das Short-Term- und Long-Term-Memory weiterentwickelt, Regeln zur Identifikation lernrelevanter Daten implementiert, Werkzeuge zur nutzergerichteten Datenbereitstellung geschaffen und Verfahren zur automatischen Erzeugung annotierter Datensätze entwickelt. Schnittstellen zu automatisierten Fahrzeugen, Schutzengel-Funktionen und Infrastruktursensorik wurden spezifiziert und umgesetzt. Eine MLOps/DevOps-Kette wurde aufgebaut: Data Version Control, Experiment-Tracking, Continuous Integration, automatisches Testen, Model Registry sowie Continuous Deployment einschließlich Bereitstellung von KI-Modulen. Zudem unterstützte das ika die Anbindung des Digitalen Zwillings an die Leitwarte und trug dazu bei, alle Systeme demonstrieren zu können.

Das **Institut für Mess- und Regelungstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie** hat im Rahmen des Arbeitspaketes 5.2 eine Risikometrik zur Beurteilung von Trajektorien entwickelt und simulativ getestet. Grundlage dieser Metrik ist ein gelerntes Modell zur gemeinsamen Trajektorienprädiktion mehrerer Verkehrsteilnehmer. Die hiermit generierten Prädiktionen sind multi-modal, sodass für jeden Verkehrsteilnehmer verschiedene Trajektorien mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten prädiziert werden. Mithilfe einer Clusteranalyse werden daraufhin Konfliktpunkte identifiziert, welche die Grundlage der Risikoberechnung bilden. Die Methode wurde auf dem Waymo Open Motion Datensatz getestet.

Das **Institut für Flugsystemdynamik der RWTH Aachen** hat im Rahmen des Arbeitspaketes 5.2 die Info-Biene in die diensteorientierte Gesamtarchitektur integriert. Zu diesem Zweck erfolgte eine Spezifikation und Abstimmung der erforderlichen Schnittstellen in enger Kooperation mit allen Konsortialpartnern. Dadurch ist eine interoperable Nutzung der erfassten Sensordaten innerhalb des gesamten Projektkonsortiums gewährleistet.

Zur Validierung der Datenübertragungsstrecken wurden in Zusammenarbeit mit Vodafone umfangreiche Flugversuche durchgeführt. Die dabei gewonnenen Messdaten dienten als Grundlage für die Implementierung mehrerer Maßnahmen zur Erhöhung der Übertragungsstabilität und Ausfallsicherheit, darunter die Verwendung von 5G-Modulen. Darüber hinaus wurde ein Verfahren zur dynamischen Bahnplanung entwickelt, das eine On-Board-Berechnung von Trajektorien auf Basis eingehender Bodenanfragen ermöglicht. Zusätzlich wurde eine bidirektionale Anbindung an die Bodenstation realisiert, wodurch eine nachgelagerte Optimierung der geplanten Trajektorien am Boden möglich ist. Die entwickelten Konzepte wurden im Rahmen der Abschlussdemonstration evaluiert. Hierbei konnte der Teleoperator die Info-Biene in Echtzeit anfordern, woraufhin das System autonom den Einsatzort anflog und die Bilddaten erfolgreich an die Bodenstation übermittelte.

Das **Institut für Robotik, Künstliche Intelligenz und Echtzeitsysteme der TU München** hat eine umfassende Softwarelösung entwickelt, die Infrastruktursensordaten verarbeitet und für die Erstellung eines Echtzeit-Digitalen Zwillings des Verkehrs des TUM-Testfelds verwendet wird. Außerdem wurde durch die Konvertierung jeweils eigener digitaler Zwillingsschnittstellen in eine standardisierte ETSI-CPM-Schnittstelle ein ROS-basierter Software-Stack für kooperative Wahrnehmungsnachrichten entwickelt. Dadurch konnten die Wahrnehmungsergebnisse der straßenseitigen Verkehrsüberwachungssysteme aus drei intelligenten Testfeldern (Aachen, München, Ulm) über eine harmonierte Schnittstelle vernetzt werden, wodurch ein echtzeitfähiger vernetzter 3D-Verkehrszwilling realisiert wurde. Die erzielten Ergebnisse wurden auf der Abschlussveranstaltung des Projekts mithilfe von dem Visualisierungstool Lichtblick demonstriert. Darüber hinaus wurde der digitale Verkehrszwilling des TUM-Testfelds ebenso in Form einer

Reihe von multimodalen Datensätzen aufgezeichnet und die wissenschaftlichen Erkenntnisse hierzu in Fachpublikationen veröffentlicht.



Abbildung 18: Gleichzeitige Visualisierung der echtzeitigen digitalen 3D-Verkehrszwillinge der Testfelder Aachen, München und Ulm in der Visualisierungstool Lichtblick

Das Thema der durch neuromorphe Sensorik (DVS) erweiterten Wahrnehmung wurde im Rahmen des Projekts ebenfalls vertieft untersucht. Hierbei kamen neuromorphe Ereigniskameras zum Einsatz. Die von diesen Sensoren erzeugten Wahrnehmungsdaten wurden mithilfe von KI-gestützten Fusionsalgorithmen mit den Informationen der RGB-Kameras fusioniert, um ein robustes straßenseitiges Wahrnehmungssystem sowie den entsprechenden digitalen Zwilling zu realisieren, das auch in herausfordernden Szenarien wie Nachtbedingungen zuverlässig funktioniert. Die Forschungsergebnisse wurden in Form der öffentlich zugänglichen Datensätze TUMTraf Event und TUMTraf CrossVision sowie in den zugehörigen wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht.

Das **Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik der Universität Ulm** hat zu Beginn des Projekts bisherige Vorerfahrungen im Bereich V2X-Kommunikation und ETSI-Nachrichten mit den jeweiligen Projektpartnern geteilt. Auf dieser Basis wurden die Schnittstellen in autotech.agil definiert und der zugehörige Open-Source-Code auf Github veröffentlicht. Darauf aufbauend wurde gemeinsam mit den Partnern ein neues Konzept für die Anbindung von Fahrzeugen und Infrastruktur an den Digitalen Zwilling entwickelt, welches die Kompatibilität verschiedener Versionen der ETSI-Nachrichten miteinander ermöglicht. Zudem wurden Fusions- und Trackingverfahren, die im Digitalen Zwilling der UULM an der Pilotanlage in Ulm-Lehr und in den Versuchsfahrzeugen eingesetzt werden, weiterentwickelt. Die Anbindung an den Digitalen Zwilling wurde seitens der UULM sowohl für ein automatisiertes Versuchsfahrzeug als auch für die Infrastruktur-Pilotanlage im Testfeld Ulm implementiert und getestet. Die Anbindung des digitalen Live-Zwillings wurde während der Abschlussveranstaltung an zwei Live-Demos gezeigt, sowohl für die Demo des digitalen Zwillings in Aldenhoven vor Ort als auch für die Demo der Live-Streams des Testfelds in Ulm-Lehr.

Die **Hexagon Manufacturing Intelligence Germany GmbH** (ehemals Vires Simulationstechnologie GmbH) hat zu Beginn des Projekts ein Konzept entwickelt, wie OpenStreetMap-Highways zu OpenDRIVE-Referenzlinien mit befahrbaren Radien konvertiert werden können. Fahrstreifen werden nach Straßenbauregelungen oder OpenStreetMap-Informationen hinzugefügt. Das Produkt Virtual Test Drive (VTD) wurde um eine Schnittstelle zu ROS 2 erweitert. Zum Ende des Projekts wurde bei ASAM eine Verbesserung zur Definition von Ampeln und dessen Schaltplänen in OpenDRIVE und OpenSCENARIO eingereicht.

Die **IPG Automotive GmbH** befasste sich in diesem Arbeitspaket mit der Umsetzung des digitalen Zwillings und der kollektiven Funktionalitäten auf Basis der hauseigenen Simulationsumgebung CarMaker. Hierbei wurde CarMaker auf

die Version 12 aktualisiert, um ROS 2 Interfaces ergänzt und in eine Docker Umgebung überführt, wodurch Simulationen plattformübergreifend durchführt werden konnten. Außerdem wurden Ray-Tracing basierte RSI-Sensormodelle von CarMaker mittels CUDA-GL Image sowie das 3D-Modell des Forschungsfahrzeuges autoSHUTTLE aus dem Vorgängerprojekt UNICARagil in das Simulationsframework integriert.

Zwecks Simulation der V2X Kommunikation wurde das V2X Interface Add-on für CarMaker gemäß den Anforderungen aus dem Projekt weiterentwickelt. Hierbei wurde die Implementierung von relevanten Day 1 und Day 2 V2X Nachrichten (CAM, DENM, CPM, SPATEM von ETSI und BSM, SPAT von SAE), die einer schnellen und weitreichenden Verteilung von Informationen in der Simulation dienen, weitestgehend abgeschlossen. Im Zuge dieser Aktivitäten wurden neue repräsentative Simulationsszenarien erstellt, wie beispielsweise das Day 2 Szenario zum Anwendungsfall des VRU-Schutzes, aufbauend auf einem CarMaker HD Szenario. Parallel dazu wurden mehrere Software-Module zur Visualisierung von V2X Nachrichten unter CarMaker MovieNX implementiert. Außerdem wurden verschiedene Optionen zur statischen und dynamischen Platzierung von Sensormodellen an externen Objekten sowie Funktionen zur standardkonformen Encodierung und Decodierung von V2X Nachrichten erprobt, um eine wichtige Grundlage für die Realisierung von weiteren Day 1, Day 2 und perspektivisch Day 3 Anwendungsfällen der V2X Kommunikation zu schaffen.

2.5.3 AP 5.3: Verteilte Verhaltensentscheidung

Im AP 5.3 wurden kooperative Verhaltensentscheidungen in verteilten Systemen in mehreren Aspekten erforscht und signifikant vorangetrieben.

Einerseits wurden kollektive Verhaltensmodelle aus Flottendaten abgeleitet und so aufbereitet, dass damit ein gelerntes Verhaltensmodell trainiert werden konnte. Darüber hinaus wurde gezeigt, wie die konkrete Verhaltensentscheidung bzw. Trajektorienplanung auf einen Edge-Server ausgelagert werden kann, der das Gesamtlagebild aus dem digitalen Zwilling für die kooperativ optimale Entscheidung einbeziehen kann. Im Gesamtbild der verteilt orchestrierten serviceorientierten Systemarchitektur wurde damit demonstriert, wie Fahrfunktionen flexibel auf die Infrastruktur ausgelagert und damit effizienter gelöst werden können.

Zum anderen wurde ein neues Konzept der kollaborativen Teleoperation entwickelt, mit dem Grenzfälle und Ausnahmesituationen, die auch langfristig vollautomatisierte Fahrfunktionen beschränken werden, sicher und effizient gelöst werden können. Arbitrationsgraphen ermöglichen es, die Teleoperation elegant in die Softwarearchitektur einzubinden. Da bei der kollaborativen Teleoperation das Fahrzeug eigenständig einen Teleoperator anfragt, der dann lediglich die Grenzen des zulässigen Fahrverhaltens erweitert, kann einerseits ein Teleoperator eine ganze Flotte von Fahrzeugen betreuen, da diese nicht ständig von ihm überwacht werden müssen. Gleichzeitig behält das Fahrzeug innerhalb der neuen Grenzen die Verantwortung, sodass selbst eine gestörte oder ausgefallene Verbindung nicht die Sicherheit des teleoperierten Systems gefährdet. Dies entlastet außerdem den Teleoperator.

Schließlich wurde gezeigt, wie mit einer Flugdrohne das bodengebundene Lagebild der Fahrzeuge effektiv ergänzt und erweitert werden kann. Hierzu wurden das Luftlagebild zu den Leitwarten und -zentralen gespielt.

Alle Aspekte wurden mit drei automatisierten Fahrzeugen, einer Flugdrohne, einem Edge-Server sowie zwei Leitwarten erfolgreich demonstriert.

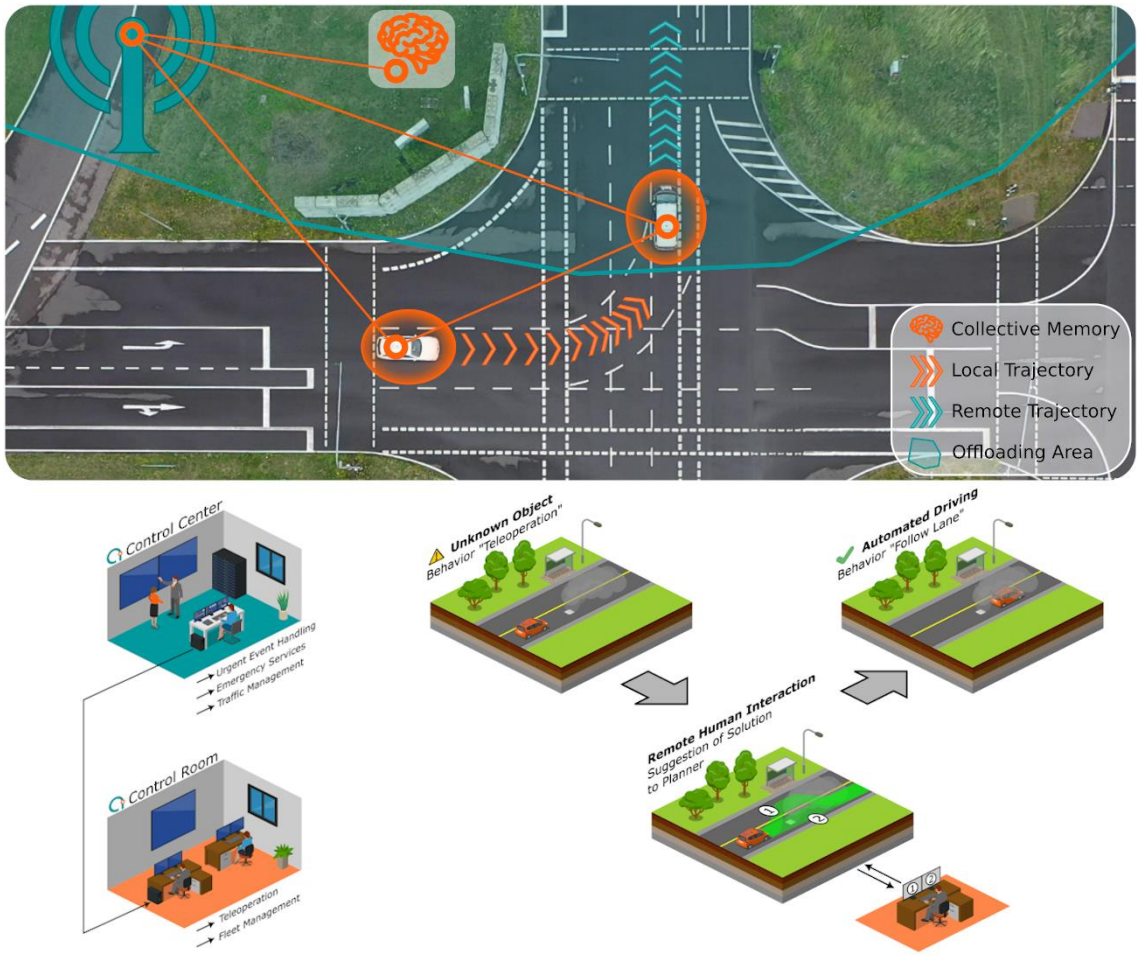


Abbildung 19: Veranschaulichung zwei der in AP 5.3 entwickelten verteilten Verhaltensentscheidungen: Ausgelagerte kooperative Verhaltensplanung (oben) und kollaborative Teleoperation (unten)

Beiträge der beteiligten Projektpartner:

Das **Institut für Mess- und Regelungstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie** hat das Konzept der Teleoperation in den methodisch bereits etablierten Arbitrationsgraph zur Verhaltensentscheidung für automatisierte Fahrzeuge integriert. Arbitrationsgraphen erlauben nicht nur eine softwarearchitektonisch effiziente Integration mehrerer und auch neuer Verhaltensblöcke, wie der Teleoperation. Sie wurden auch als Werkzeug genutzt, um die Verhaltensentscheidungen zielgruppenspezifisch zu visualisieren sowie Manöver und Verhaltensentscheidungen zu analysieren.

Die Teleoperation ist dabei in Szenarien gerechtfertigt, in der die Verhaltensentscheidung des Fahrzeugs die üblichen Verkehrsregeln brechen müsste, um eine Trajektorie zum Bewegungsfortschritt planen zu können. Als beispielhafte Szenarien wurde das Umfahren eines Hindernisses beim Überholverbot sowie das Durchfahren eines Geisterobjekts, welches eigentlich durchfahren werden kann, definiert. In beiden Szenarien befindet sich das Fahrzeug im autonomen Modus und entscheidet selbständig, dass ein menschlicher Eingriff in die Randbedingungen der Planung notwendig ist. Der Teleoperator besitzt nur ein anfragebasiertes Eingriffsrecht und kann nach Benachrichtigung bspw. den befahrbaren Bereich vergrößern oder den durch das Fahrzeug definierten Haltepunkt verändern oder freigeben. Diese kooperative Teleoperation ist softwareseitig elegant eingebunden, durch die nur temporäre Aufschaltung des Teleoperators sehr effizient und durch die Modifikation der Randbedingungen gleichzeitig ergonomisch und sicher, da das Fahrzeug das Teleoperationsmanöver selbst überwacht.

Weiterhin wurde in diesem Arbeitspaket das durch eine Drohne (Info-Biene) bereitgestellte Luftbild analysiert und mittels Lokalisierung und Objektdetektion in ein verwertbares Lagebild für automatisierte Fahrzeuge umgewandelt. So können gleichzeitig Informationen vom Boden oder aus der Luft im digitalen Zwilling fusioniert werden.

Der **Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der TU München** hat im Rahmen von AP 5.3 die Teleoperation als Unterstützungsebene in den Planungsprozess automatisierter Fahrzeuge integriert. Der Operator greift im Fall eines Disengagements (in dem die Automation keine Lösung für die vorliegende Situation findet) nicht direkt in die Fahrzeugsteuerung ein, sondern wirkt kollaborativ auf der Ebene der Trajektorienplanung. Wenn das Fahrzeug aufgrund einer Falschdetektion oder einer blockierten Fahrspur keine gültige Trajektorie finden kann, erkennt das System diesen Zustand automatisch und aktiviert das Teleoperations-Verhalten. Über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI) wird der Operator benachrichtigt und erhält Zugriff auf Live-Kamerabilder sowie ein interaktives Umgebungsmodell, in dem die aktuellen Planungsrandbedingungen visualisiert sind.

Der Operator kann diese Planungsgrenzen anpassen (beispielsweise den befahrbaren Raum erweitern oder eine Stopplinie freigeben) und überträgt die Änderungen an das Fahrzeug. Die Automation berechnet anschließend eine neue Trajektorie innerhalb der durch den Menschen geänderten Randbedingungen und sendet sie zur Freigabe zurück. Erst nach Bestätigung durch den Operator wird die Trajektorie ausgeführt, wobei der Operator den Vorgang kontinuierlich überwacht. Die modulare Integration ermöglicht Eingriffe ohne Änderungen am ursprünglichen Planungsmodul und erweitert so flexibel den operationellen Bereich des Fahrzeugs.

Das Konzept wurde in das Gesamtsystem und in ein reales automatisiertes Fahrzeug integriert. Durch die entwickelten Schnittstellen bleibt die Methode in weiten Teilen architekturunabhängig und erweiterbar. In der Anwendung auf dem Realfahrzeug wurden zwei Hauptszenarien erfolgreich demonstriert: Das Überfahren einer nicht klassifizierbaren Ampel durch die longitudinale Begrenzung sowie das Umfahren eines realen Hindernisses bei Überholverbot durch Erweiterung der lateralen Randbedingungen. Damit zeigt die Methode, wie sich durch Teleoperation die Handlungsfähigkeit automatisierter Fahrzeuge erweitern lässt.



Abbildung 20: Teleoperations-Arbeitsplatz. Gezeigt ist die Anpassung der lateralen Planungsrandbedingungen im Fall eines Disengagements aufgrund eines blockierenden Objekts in der Ego-Fahrspur. Der Teleoperator erweitert den Befahrbaren Bereich in lateraler Richtung über die entgegenkommende Fahrspur, um eine Lösung der Situation zu ermöglichen

Das **Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen** hat im Rahmen von AP 5.3 eine modulare Architektur zur Integration und Orchestrierung verschiedener Verhaltensentscheidungsmodule für die Bewegungsplanung vernetzter automatisierter Fahrzeuge entwickelt. Dabei lag der Fokus auf den folgenden beiden Modulen zur (verteilten) Verhaltensentscheidung:

- Kollektives Verhaltensmodell**:** Auf Basis von Flottendaten aus dem digitalen Zwilling wurden Trajektorien- und Verhaltensdaten extrahiert. Diese Daten wurden gemäß zuvor definierter Metriken evaluiert und zur Ableitung der Verhaltensmodelle aufbereitet. Als kollektives Verhaltensmodell selbst wurde ein neuronales Netz entwickelt, das gewünschtes Verhalten erlernt und auf neue Verkehrssituationen übertragen kann.

- Off-board-Verhaltensentscheidung**:** In diesem Ansatz erfolgt die gesamte Verhaltensentscheidung auf einem MEC-Server mit Zugang zu einem digitalen Zwilling des Verkehrs. Als Nachrichtenformat für die V2X-Kommunikation wurden die standardisierten ETSI-V2X-Nachrichten verwendet. Das im Projekt *autotech.agil* entwickelte Open-Source-Modul etsi_its_messages wurde hierzu um Verhaltensnachrichten (MCMs) erweitert. Die Off-board-Verhaltensentscheidung wurde dabei durch UULM-MRM entwickelt und durch RWTH-IKA in die Architektur integriert.

Mithilfe der entwickelten Planungsarchitektur können die verschiedenen Verhaltensmodule situationsspezifisch orchestriert werden, um deren jeweilige Stärken zu kombinieren und so eine sichere sowie effiziente Bewegungsplanung zu ermöglichen. Darüber hinaus sieht die entwickelte Architektur ein nachgeschaltetes Sicherheitsmodul vor, das im Falle einer fehlerhaften Verhaltensentscheidung eine sichere Fahrzeugführung gewährleistet.

Das Gesamtkonzept wurde in Kooperation mit UULM-MRM im Rahmen der Abschlussdemonstration mit dem Forschungsfahrzeug “karl.” des ika-RWTH erfolgreich demonstriert.

Das **Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik der Universität Ulm** hat im Rahmen von AP 5.3 ein neues Konzept für verteilte, dienste-orientierte Architekturen entwickelt. Für verteilte, kooperative Verhaltensentscheidung wurde das Konzept Function Offloading verwendet, um die Trajektorienplanung vom Fahrzeug auf einen Mobile-Edge-Computing-Server (MEC-Server) auszulagern, auf dem ein digitaler Zwilling des Verkehrs verfügbar ist. Dieser profitiert für die Planung damit direkt von den erweiterten Informationen, zudem kann Rechenkapazität im Fahrzeug eingespart werden. Im Zusammenhang mit der in autotech.agil verwendeten service-orientierten Architektur kann das Fahrzeug nun zusätzliche Dienste, wie z.B. die Trajektorienplanung, der Infrastruktur nutzen, um die Fahraufgabe effizienter oder sicherer zu lösen. Das entwickelte Konzept wurde während der Projektlaufzeit in einer Journal-Publikation (RA-L) veröffentlicht, ebenso wurde eine Erweiterung des Konzeptes mit Sicherheitsbetrachtung während der Projektlaufzeit auf einer Konferenz eingereicht und angenommen (ITSC 2026). Das Konzept wurde insbesondere darauf ausgelegt, mit den im Projekt verwendet ETSI-Nachrichten kompatibel zu sein. Für die service-orientierte Trajektorienplanung sendet das Fahrzeug die Position (CAM-Nachricht) und das Umfeldmodell (CPM-Nachricht) an den Server und empfängt die Trajektorien über eine eigene MCM-Nachricht. Für die Abschlussdemonstration hat die UULM die Koordination und Planung der Demo 4 – Verteilte Verhaltensentscheidung übernommen. Die service-orientierte Trajektorienplanung wurde in Aldenhoven zusammen mit dem ika-RWTH ausführlich getestet und auf der Abschlussdemonstration gemeinsam live präsentiert. Die Präsentation mit zwei Versuchsträgern zeigt die Flexibilität des im Projekt neu entwickelten Ansatzes, der mit unterschiedlichen Automationsansätzen kompatibel ist.

2.6 Haupt-AP 6: Durchgängiges Sicherheitskonzept & Algorithmen

2.6.1 AP 6.1: Durchgängige Sicherheitsbetrachtung

Im Projekt wurde eine Analyse der Risikokonstellation durchgeführt, die von der Operationsdomäne der Elemente des automatisierten und vernetzten Mobilitätssystems ausgeht. Dabei wurde identifiziert, dass die variierende Erwartungshaltung verschiedener Stakeholder bezüglich der Sicherheit auf teils unterschiedlichen Definitionen und Verständnissen beruhen und nur eingeschränkt durch bestehende Regulierungen zusammengebracht werden. Daraus resultiert, dass ein expliziter Umgang mit den Risiken autonomer Straßenfahrzeuge auch die Kommunikation desselben beinhalten muss. Es wurde deutlich, dass Abwägungen zur Entwicklungszeit erhebliche Implikationen für die gesellschaftliche Akzeptabilität haben können. Die Unsicherheiten in der Entwicklung sowie des Laufzeitsystems wurden im Rahmen einer Sicherheitsargumentation dokumentiert. Verschiedene aus der Argumentation abgeleitete Artefakte konnten die sicherheitsbezogene Kommunikation projekt- bzw. organisationsintern sowie nach außen unterstützen. Die Freigabedokumentation spielt eine zentrale Rolle für die Offenlegung bestehender Gefährdungen, der Sicherheitsmaßnamen sowie des resultierenden Restrisikos. Bei einem softwarelastigen Mobilitätssystem ist die Simulation ein unverzichtbarer Bestandteil verschiedener Entwicklungsaktivitäten. Daher wurde im Projekt ein Ansatz entwickelt, mit den Unsicherheiten der Simulationsmodelle systematisch umzugehen und diese in einem formalisierten Modell gegenüber Anforderungen aus den Anwendungsfällen zu bewerten. Die Ergebnisse wurden in wissenschaftlichen Veröffentlichungen festgehalten.

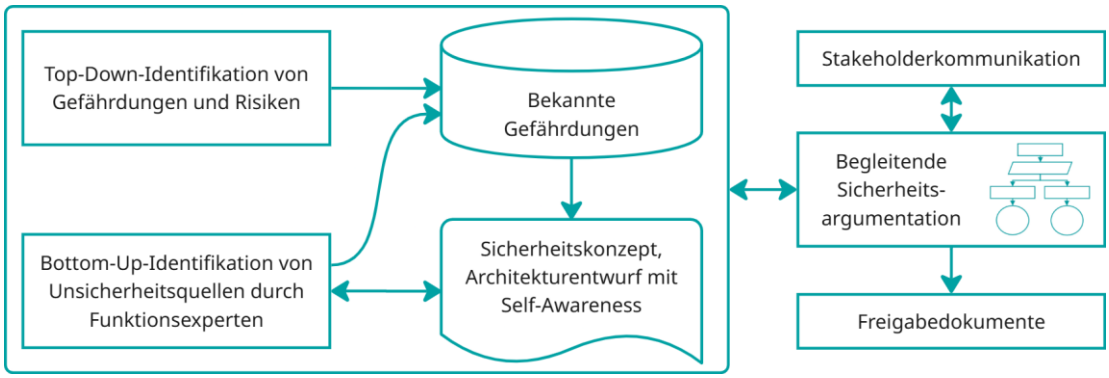


Abbildung 21: Ein iteratives Vorgehen unter Einbindung operationsdomänenbasierter Analyse und Expertise der Funktionsentwickler wurde zur gemeinsamen Erarbeitung eines Sicherheitskonzepts und Architekturentwurfs genutzt. Im Mittelpunkt der internen und externen Stakeholderkommunikation steht eine gemeinsame Sicherheitsargumentation.

Beiträge der beteiligten Projektpartner:

Das **Institut für Regelungstechnik der TU Braunschweig** war als einziger Partner an diesem AP beteiligt.

2.6.2 AP 6.2: Homologationsprozesse & Methoden zur modularen Absicherung

Im Arbeitspaket 6.2 wurden zentrale Grundlagen für die Absicherung und Homologation von Software- und Elektronikfunktionen im Betrieb geschaffen. Zunächst lag der Schwerpunkt auf der Entwicklung eines strukturierten Prozesses, der agile und automatisierte Update- und Upgradefähigkeit unterstützt und sich an aktuelle regulatorische Rahmenwerke anlehnt. Ergänzend wurden Methoden zur Spezifikation und Absicherung von Modulen mit KI-Anteilen erarbeitet, um deren Verhalten transparent zu machen und eine robuste Nachweisführung zu ermöglichen.

Datengetriebene Verfahren wie Explainable AI und Out-of-Distribution-Detektion wurden erforscht, um Qualitätsbewertungen und Fehleranalysen zu ermöglichen. Diese Ansätze bilden die Basis für eine kontinuierliche Verbesserung von Funktionen und eine skalierbare Absicherung im Betrieb. Parallel dazu entstanden Konzepte für Updatefähigkeit, die prototypisch umgesetzt wurden, einschließlich containerisierter Architekturen und cloudbasierter Validierungsmechanismen.

Zur virtuellen Absicherung wurde mit CARLOS eine generische Simulationsarchitektur für szenarienbasierte Tests entwickelt, die automatisierte Ausführung und reproduzierbare Ergebnisse ermöglicht. Sie unterstützt CI/CD-Pipelines und schafft eine Grundlage für die Absicherung komplexer Systeme. Exemplarisch wurden sowohl in CARLOS, als auch einer CarMaker-Simulation ein AD- und V2X Stack integriert und getestet. Diese Integration erlaubte eine bidirektionale Interaktion zwischen Fahrzeugmodell und AD-Stack sowie die Demonstration vernetzter Funktionalitäten anhand von Beispielszenarien. Zusätzlich wurden virtuelle ECU-Komponenten prototypisch eingebunden, um skalierbare Tests bereits in frühen Entwicklungsstadien zu ermöglichen. Insgesamt liefert das Arbeitspaket einen wichtigen Beitrag zur Standardisierung sicherer, updatefähiger Fahrzeugsoftware und zur Absicherung KI-basierter Module im Homologationskontext.

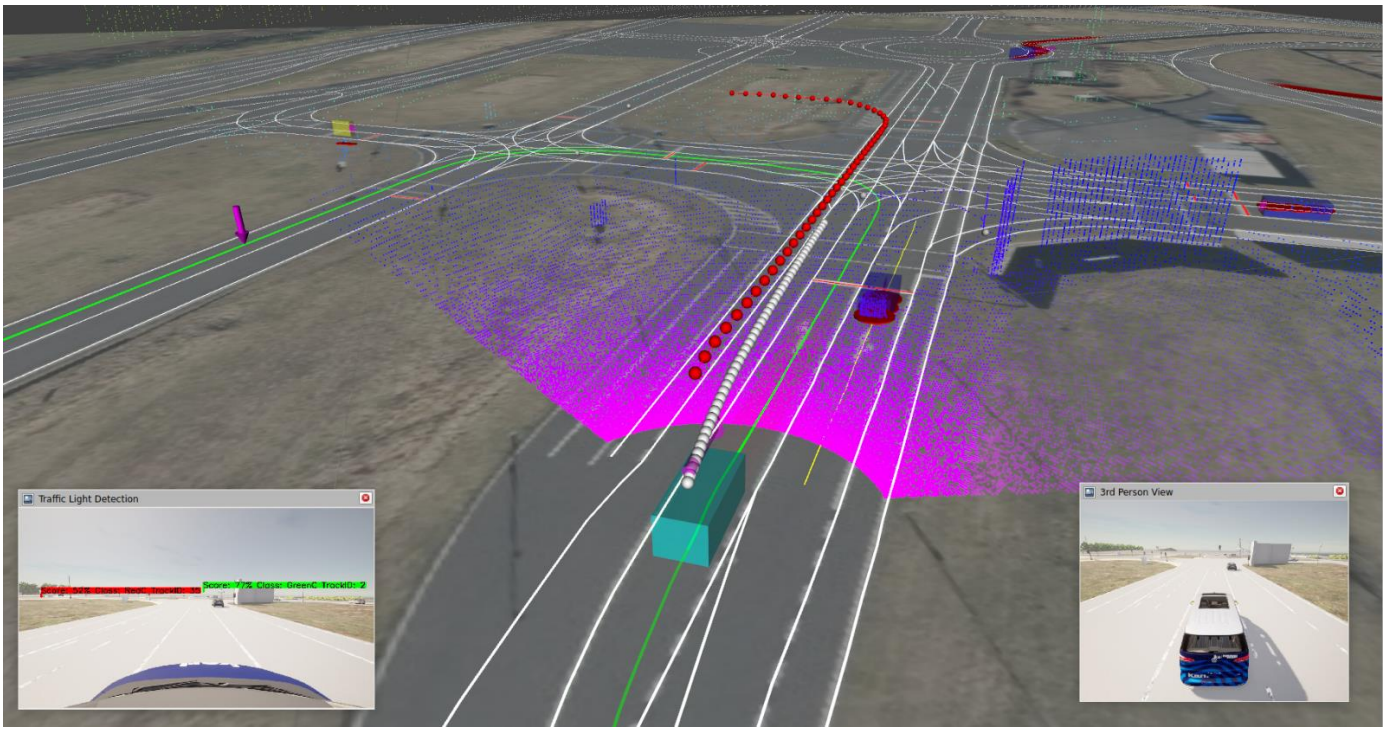


Abbildung 22: Vollständige CARLOS-Simulation vom RWTH-IKA AD-Stack in einem ausgewählten Szenario am Aldenhoven Testing Center.

Beiträge der beteiligten Projektpartner:

Die **ZF Friedrichshafen AG** übernahm in diesem Arbeitspaket die Leitung, um gemeinsam mit den Projektpartnern Lösungen zur Absicherung von Funktionen innerhalb einer serviceorientierten Architektur zu entwickeln. Hierzu wurden bestehende Standards recherchiert und hinsichtlich ihrer Relevanz für das Projekt bewertet. Auf dieser Basis entstanden Absicherungsprozesse, die kontinuierlich um geeignete Methoden erweitert wurden.

Als Anwendungsfall stand exemplarisch die Funktion der Sirenenerkennung. Zur Absicherung dieser Funktion wurden moderne Verfahren wie Conformal Prediction und Out-of-Distribution (OoD)-Detektion eingesetzt, um einen robusten Qualitätsvektor zu erzeugen. Diese Methoden ermöglichen nicht nur ein zuverlässiges Monitoring der Funktion, sondern auch die Identifikation neuartiger Daten aus dem Feld, die bisher nicht im Trainings- oder Testdatensatz enthalten waren. Solche Daten können gezielt in zukünftige Trainings- und Validierungsprozesse integriert werden, um die Funktion kontinuierlich zu verbessern und robuster zu gestalten.

Zusätzlich wurde ein Konzept zur Validierung des resultierenden Qualitätsvektors erarbeitet und prototypisch implementiert. Die entwickelten Absicherungsmethoden wurden so umgesetzt, dass sie skalierbar in der Cloud ausgeführt werden können. Dabei lag ein besonderer Schwerpunkt auf der Bewertung der Sirenenerkennung hinsichtlich Performanz, Robustheit und Stabilität, wofür entsprechende Metriken entwickelt wurden. Die in AP 3.4 eingeführten Abstraktionen über Docker-Container und die ONNX-Runtime ermöglichten eine nahtlose Cloud-Ausführung in einem Daten Replay-SIL (Software-in-the-Loop).

Durch die Umsetzung eines Update-Konzepts aus AP 7.1 konnten Funktionen über Docker-Container aktualisiert werden. Ein vollständiger Durchstich durch die gesamte Entwicklungskette konnte im Projekt jedoch nicht realisiert werden, da hierfür eine direkte Anbindung der Trainingspipeline an den Test- und Absicherungsprozess erforderlich gewesen wäre.

Ergänzend wurden die Arbeitspakete durch cloudbasierte Dienste unterstützt. So wurde eine Schema Registry erstellt, um exemplarisch Metadaten aus dem Feld zu überprüfen. Zudem wurde eine Build-Pipeline für die Services umgesetzt und die Anbindung der UniS-ILH im Rahmen von AP 2.2 realisiert.

Als Testinstanz und Prototyping-Plattform kam Hardware-in-the-Loop (HIL) zum Einsatz, um die Integration der Funktionen zur Sirenen- und Hilferuferkennung, sowie Wellbeing zu testen. Darüber hinaus wurde am HIL-Prüfstand das Konzept zur TSN/DDS-Integration in Zusammenarbeit mit AP 2.1 und AP 3.4 umgesetzt. Hieraus entstand wertvolles Know-how im Bereich TSN-Netzwerke und DDS-Middleware, das in Folgeprojekten weiter genutzt werden kann.

Der mit der Cloud vernetzte HIL-Prüfstand wurde eingesetzt, um u. a. eine reibungslose Integration in das autoSHUTTLE für die finale Projektdemo vorzubereiten und den Prozess mit den Methoden aus AP 6.2 zu verbinden. Für die datengetriebene Validierung stellte er in Verbindung mit dem Replay-SIL einen großen Teil der notwendigen Validierungskette dar. Ebenso ließ sich die Updatebarkeit der in AP 3.4 gebauten Docker-Images auf die Zielplattformen mit dem HIL-System testen. So konnte neben den anderen ZF-Anwendungsfällen auch die EcoControl-Funktion in AUTOSAR Adaptive mit den Methoden aus AP 3.4 integriert und getestet werden.

Das **Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen** hat während der Projektlaufzeit Methoden und Werkzeuge für das szenarienbasierte Testen in der Simulation erforscht. Dazu wurden Anforderungen zwischen Absicherungsprozess und Funktionsentwicklung abgestimmt und daraus eine klare Schnittstellendefinition für simulationsgestützte Tests erarbeitet. Auf Basis der Anforderungen und einer detaillierten Toolanalyse konnte eine generische Simulationsarchitektur konzipiert werden. Diese zeichnet sich durch containerisierte Dienste, eine skalierbare Orchestrierung, einen austauschbaren Simulationskern sowie standardisierte Schnittstellen aus. Exemplarisch wurde die Architektur für den CARLA-Simulator und den IPG CarMaker implementiert. Beide Frameworks ermöglichen eine einfache Integration von Funktionen durch abgestimmte ROS-2-Nachrichtenformate – fahrzeugintern für Perzeption und Planung sowie fahrzeugextern über die Nutzung der ETSI-ITS-Nachrichtenformate. Das CARLOS-Framework ermöglicht neben der prototypischen Integration von Funktionen auch die automatische Generierung und Speicherung

von Simulationsdaten sowie die skalierbare Ausführung szenarienbasierter Tests im Rahmen von CI/CD-Pipelines. Das Framework ist auf GitHub öffentlich verfügbar.

Die Harmonisierung zwischen CARLOS und CarMaker wurde durch die Integration eines durchgängigen AD-Software-Stacks vertieft, der anschließend für szenarienbasierte Tests eingesetzt wurde. Die generische Architektur ermöglicht Reproduzierbarkeit, Versionierung sowie automatische Auswertungen.

Darüber hinaus wurde das CARLOS-Framework hinsichtlich hoher Skalierbarkeit entwickelt. CI-Pipelines triggern szenarienbasierte Tests, die verteilt in einem Kubernetes-Simulationsrechencluster ausgeführt werden können. Hierbei kommen unterschiedliche DevOps- und Orchestrierungsprinzipien zum Einsatz, die für den vorliegenden Kontext konkretisiert wurden. Insgesamt liegt damit eine generische Simulationsarchitektur für das szenarienbasierte und automatisierte Testen von Funktionen für das automatisierte Fahren vor.

Aus der Arbeit des **Fachgebiets Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt** resultieren Methodenbausteine zur Absicherung von KI-basierten Perzeptionsmodulen. Dabei wurde eine Orientierung an der zuletzt veröffentlichten ISO PAS 8800 vorgenommen, die einen Rahmen für den Homologationsprozess von KI-Komponenten vorgibt. Im Fokus stand die Erforschung und Erprobung von Methoden zur Fehleranalyse in Deep-Learning-basierten Perzeptionsmodulen. Zur Identifikation und genaueren Charakterisierung von Insuffizienzen in den Modellen kam zudem Explainable AI (XAI) zum Einsatz. Dadurch konnten Schwachstellen einzelner Module transparent gemacht und die Ursachen für Fehlklassifikationen besser nachvollzogen werden. Die im Rahmen des Arbeitspakets entwickelten Verfahren lassen sich in den Homologationsprozess nach ISO PAS 8800 eingliedern und stellen somit einen wesentlichen Beitrag zur Standardisierung und systematischen Absicherung von KI-gestützten Perzeptionsfunktionen dar. Für die modulare Absicherung wurde eine datengetriebene Methode zur Ableitung und Spezifikation des gewünschten und unerwünschten Modulverhaltens entwickelt. Im Rahmen einer experimentellen Anwendung auf ein Planungsmodul wurden Zielkonflikte für die Anfertigung einer absichernden Schnittstellenbeschreibung identifiziert. Ein Prozess und eine Methode zur simulativen Exploration dieser Zielkonflikte wurde entwickelt. Diese erlaubt die Evaluation der Eignung von Modulschnittstellen für eine modulare Absicherung und den Vergleich von Spezifikationsaufwand und verbleibender Modifizierbarkeit des Moduls zum Zweck von Updates.

Die **IPG Automotive GmbH** befasste sich in diesem Arbeitspaket mit der Umsetzung der Homologationsprozesse und Methoden zur modularen Absicherung auf Basis der hauseigenen Simulationsumgebung CarMaker. Hierbei wurde die technische Realisierung einer holistischen CarMaker-Simulation mit AD- und V2X-Stacks des ROS 2-Systems innerhalb einer Docker-Umgebung in Zusammenarbeit mit dem Partner RWTH-IKA verfolgt. Durch den Einsatz der harmonisierten und veröffentlichten ROS 2-Interfaces wurde somit eine bidirektionale Interaktion zwischen dem autoSHUTTLE-Fahrzeugmodell in CarMaker und dem AD-Stack erreicht und anhand von Beispielszenarien auf der virtuellen Teststrecke in Aldenhoven demonstriert. Für praktische Tests der vernetzten Funktionalitäten wurde das V2X Interface Add-on für CarMaker an den V2X Stack angebunden und in Betrieb genommen, womit das Versenden von ETSI ITS konformen V2X Nachrichten als ROS 2 Topics an andere Kommunikationspartner möglich war. Hierbei wurde eine exemplarische CPM mit der Objektliste aus CarMaker implementiert, die vom digitalen Verkehrszwilling empfangen sowie durch die Leitzentrale visualisiert werden konnte.

Darüber hinaus wurde eine prototypische vECU (mittels Software Silver von Synopsys) in Level 1 und 3 Ausführungen mit einfachen ACC- und AEB-Funktionen im Rahmen von zusätzlichen CarMaker Szenarien als FMU simuliert und evaluiert. Zur Bedienung der Schnittstellen wurden entsprechende Bussignale implementiert, wodurch ein effizientes und skalierbares Testen von virtualisierten ECU-Komponenten bereits in frühen Entwicklungsstadien ermöglicht wird.

2.6.3 AP 6.3: Cyber Security für vernetzte intelligente Verkehrssysteme

In diesem Arbeitspaket wurde ein ganzheitlicher Sicherheitsansatz für vernetzte Mobilitätssysteme mit softwaredefinierten Fahrzeugen entwickelt. Insgesamt sind dabei fünf wissenschaftliche Publikationen entstanden, die auf internationalen Konferenzen vor Fachpublikum vorgestellt wurden. Die Arbeiten knüpften unmittelbar an die Arbeiten des Vorgängerprojektes UNICARagil an, bei dem eine sichere interne Fahrzeugarchitekur im Vordergrund stand. Im Projekt autotech.agil wurde der Fokus auf sichere Softwarelösungen erweitert, die auch außerhalb des Fahrzeugs angesiedelt sind. Dazu gehören beispielsweise externe Software-Anbieter, die Infrastruktur oder auch andere Fahrzeuge.

Während die INCYDE GmbH vorrangig die Anbindung einer Public Key Infrastructure (PKI) entwickelte, konzentrierten sich die Forschungsarbeiten der Universität Passau auf die sichere Erzeugung und Verwaltung kryptographischer Schlüssel sowie auf eine Mensch-Maschine-Schnittstelle zur intuitiven und nachhaltigen Spezifizierung und Annotation von Sicherheitsparametern innerhalb einer aktualisierbaren Softwarearchitektur.

Ferner wurde in Kooperation mit der RWTH Aachen an einer Ausgründung der Forschungsarbeiten gearbeitet und erfolgreich ein EXIST-Forschungstransfer bewilligt. In diesem Rahmen wurde aktiv an der Software-Bibliothek managedDDS gearbeitet, die als eine Referenzimplementierung unserer Arbeiten in diesem AP galt.

An der Universität Passau wurden Verfahren zur hardwareunterstützten, deterministischen und sicheren Ausführung von Wirkketten entwickelt. Zudem wurde erforscht, wie fahrzeugexterne Services sicher mit internen Systemen kommunizieren können, insbesondere bei Providerwechseln. Für eine robuste Schlüsselverwaltung steuerte die INCYDE GmbH eine Automotive-PKI zu.

Insgesamt sind die Arbeiten äußert erfolgreich verlaufen und alle Ziele wurden erreicht, publiziert und am 11. September 2025 auf der Abschlussveranstaltung der Öffentlichkeit präsentiert.

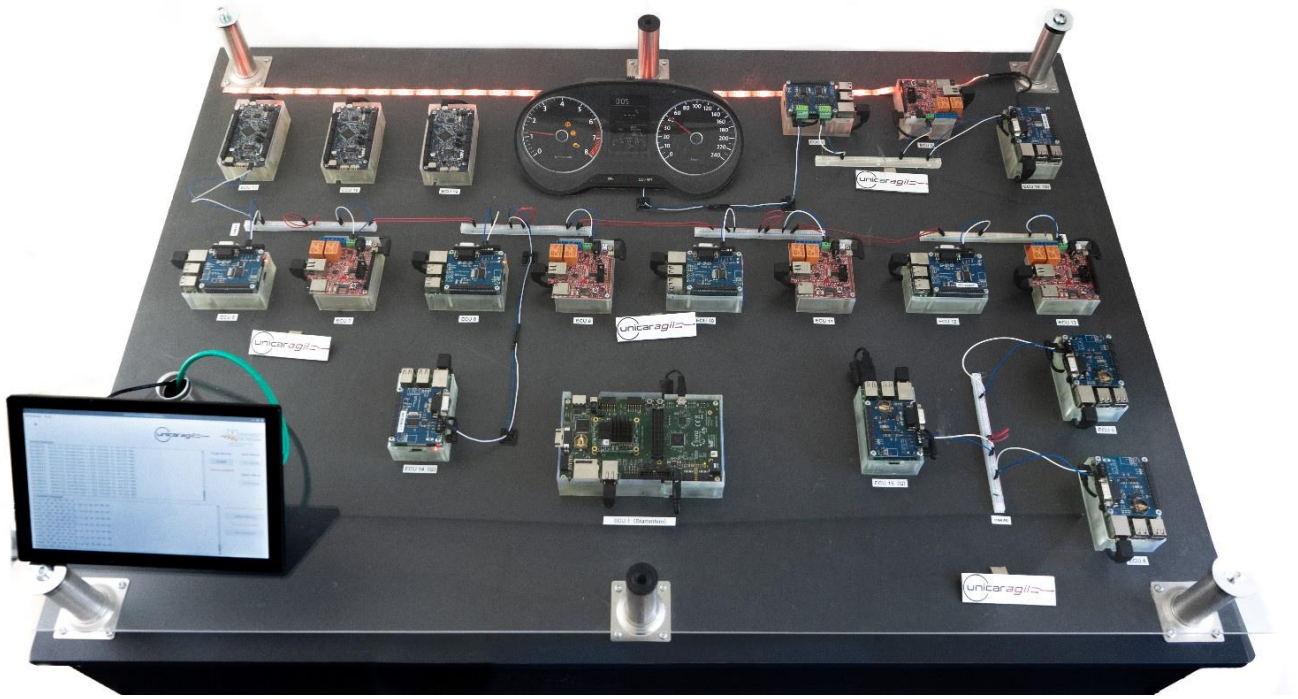


Abbildung 23: Demonstrator, an dem unsere Forschungsarbeiten implementiert, evaluiert und demonstriert worden sind

Beiträge der beteiligten Projektpartner:

Der **Lehrstuhl für Technische Informatik der Universität Passau** konzentrierte sich im Rahmen des Projekts auf die Entwicklung und Integration sicherheitsrelevanter Mechanismen für softwaredefinierte Fahrzeuge. Ein zentraler Schwerpunkt lag auf der sicheren Erzeugung und Verwaltung kryptographischer Geheimnisse, um eine vertrauenswürdige und langfristig wartbare Sicherheitsarchitektur zu gewährleisten. Darüber hinaus wurde eine Mensch-Maschine-Schnittstelle konzipiert und implementiert, die eine intuitive Spezifizierung und nachhaltige Annotation sicherheitsrelevanter Parameter innerhalb einer aktualisierbaren Softwarearchitektur ermöglicht. Diese Schnittstelle erleichtert Entwicklern die konsistente Umsetzung von Sicherheitsanforderungen über den gesamten Softwarelebenszyklus hinweg.

Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurde außerdem die Softwarebibliothek managedDDS als Referenzimplementierung der entwickelten Sicherheitskonzepte vorangetrieben. Parallel dazu wurden an der Universität Passau Verfahren zur hardwareunterstützten, deterministischen und sicheren Ausführung von Wirkketten entwickelt, um ein vorhersehbares Verhalten sicherheitskritischer Prozesse zu gewährleisten.

Hierzu wurden innovative Verfahren entwickelt, wie etwa die Beschleunigung und Priorisierung zeitlich kritischer Datenpakete auf selbstentwickelten FPGA-Designs oder die Implementierung auf Basis von Kernel-Bypass-Technologien.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der sicheren Kommunikation zwischen fahrzeuginternen und -externen Diensten, insbesondere bei wechselnden Serviceprovidern. Hierbei wurde die Sicherheit auf verschiedenen Schichten betrachtet, beginnend mit der Basis, der sicheren Schlüsselerzeugung. Zu diesem Zweck wurde ein Ring-Oscillator-PUF auf einem FPGA implementiert, der als Grundlage für eine sichere hardwaregestützte Schlüsselerzeugung dient. Zudem wurde eine Architektur entwickelt, um vertrauliche Daten im Fahrzeug mithilfe von Hardware-Fingerabdrücken sicher an die Hardware zu binden.

Schließlich wurde gemeinsam mit der RWTH Aachen die Ausgründung der Forschungsergebnisse vorbereitet und ein EXIST-Forschungstransfer erfolgreich eingeworben, um die wissenschaftlichen Erkenntnisse in marktfähige Softwarelösungen zu überführen.

Die Arbeit von **INCYDE** konzentrierte sich auf die Verbesserung der Sicherheitsarchitektur und des Sicherheitsmodells für kooperative intelligente Verkehrssysteme (C-ITS) im autotech.agil-Ökosystem. Dabei wurde eine umfassende Erstanalyse der Systemresilienz gegen Man-in-the-Middle-Angriffe (MitM) durchgeführt und eine Bewertung relevanter Security-Standards (wie ISO/SAE 21434, UN ECE R155/156) abgeschlossen. Anschließend hat die INCYDE die Sicherheitsarchitektur durch die Integration einer Public Key Infrastructure (PKI) und die konzeptionelle Einbindung von Intrusion-Detection-Systemen erweitert. Das Security-Modell wurde detailliert, insbesondere durch die Einführung von pseudonymen Identitäten (Blindsignaturen / Zero Knowledge Proofs) und die Erweiterung des Angreifermodells um Privatsphäre-Aspekte. Die Automotive Public Key Infrastructure (A-PKI) wurde konzipiert und implementiert (unter Nutzung von ETSI-Standards und Eigenentwicklungen), um die Zertifizierung kryptografischer Schlüssel zu gewährleisten. Hierfür wurden spezifische REST-Schnittstellen definiert und das notwendige Zertifizierungs-Tooling (inkl. ASN.1-Datenstrukturen in Python) entwickelt. Die initiale PoC-Umsetzung der PKI wurde zu einer stabilen Demonstrationsplattform überführt. Das gesamte Sicherheitsmodell wurde systematisch auf Konformität mit etablierten Normen (ISO/SAE 21434, IEC 62443-3) geprüft. Abschließend erfolgte der Rollout der sicheren managedDDS-Umgebung im Simulator und die Simulation von Netzwerkangriffen zur Validierung der Systemresilienz.

2.6.4 AP 6.4: Gesamtheitliche Selbstwahrnehmung über ein Monitoring-Framework

Im Projekt wurde eine modulare Referenzarchitektur für Laufzeitmonitoring in serviceorientierten Mobilitäts- und Fahrsystemen entwickelt. Ziel war es, die Güte sicherheitskritischer Dienste während des Betriebs zu überwachen und auf Abweichungen dynamisch zu reagieren. Statt eines initial geplanten monolithischen Systems wurde ein adaptives Framework mit zwei zentralen Bausteinen realisiert: Service Self Assessment für die lokale Überwachung einzelner Dienste und System Self Assessment für ein systemweites Monitoring.

Unter Beteiligung der TU Braunschweig und des Instituts i11 der RWTH Aachen wurde ein Demonstrator umgesetzt, der gezielt Fehlerzustände nachstellt. In Echtzeit erfolgt dann eine Re-Orchestrierung der Dienste, um das Systemverhalten – intern oder, bei einem Cyber-physischen System, extern – dynamisch anzupassen. Das System bleibt dabei, wie demonstriert, auch bei reduzierter Funktionalität betriebsfähig. Die finale Lösung wurde bei der Abschlussdemonstration vorgestellt.

Ein weiterer konkreter Anwendungsfall befasste sich mit der Bewegungsregelung automatisierter Fahrzeuge. Hier wurde ein Verfahren entwickelt, das prädiktiv die Ausführungsqualität basierend auf Daten vorgelagerter Services bewertet. Die Methode erlaubt eine frühzeitige Einschätzung möglicher Regelgüteabweichungen und wurde als Teil eines systemweiten Self-Assessment-Frameworks auf der International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2024, Edmonton) präsentiert.

Die TU Braunschweig bereitete auf Basis der erzielten Ergebnisse gemeinsam mit Partnern eine wissenschaftliche Publikation vor, die derzeit zur Veröffentlichung bei einer Fachzeitschrift eingereicht ist.

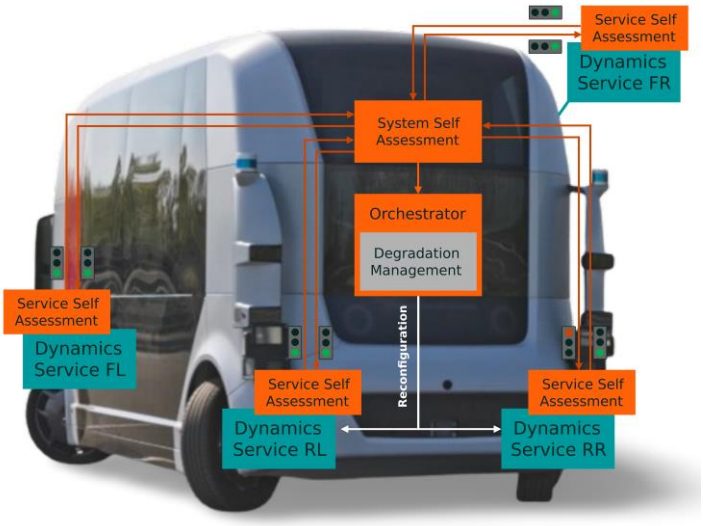


Abbildung 24: Fahrzeugprototyp autoSHUTTLE mit einem Ausschnitt seiner serviceorientierten Architektur: Jeder Dynamics Service, der eines der vier Dynamics Modules steuert, liefert einen Qualitätsvektor, der Informationen über seine Leistungsfähigkeit enthält. Eine anschließende Service Self-Assessment bewertet den Gesundheitszustand über einen Qualitätszustand (visualisiert als Ampel). Eine System Self-Assessment ergänzt diesen Zustand durch eine zusätzliche Qualitätsanzeige (dargestellt als zweite Ampel). Bei Dienstleistungsdegradationen (wie im Dynamics Service RR) konfiguriert ein Orchestrator in der Middleware das System neu, um den Betrieb aufrechtzuerhalten (FL = Front Left, FR = Front Right, RL = Rear Left, RR = Rear Right).

Beiträge der beteiligten Projektpartner:

Das **Institut für Regelungstechnik der TU Braunschweig** war als einziger Partner an diesem AP beteiligt. Die Zusammenarbeit mit anderen Projektpartnern erfolgte über das Haupt-AP 1.

2.7 Haupt-AP 7: Use Cases & Proof of Concept

2.7.1 AP 7.1: Inklusive Personenmobilität

Das Ziel von AP 7.1 war es, anhand verschiedener Maßnahmen die Nutzererfahrung mit autonomen Shuttles zu verbessern. Die entwickelten Funktionen wurden in das autoSHUTTLE integriert, das als Ergänzung zum inklusiven ÖPNV dient. Darüber hinaus ist das Forschungsfahrzeug in das Gesamtsystem des digitalen Live-Zwillings eingebunden und reagiert dynamisch auf hoheitliche Eingriffe der Leitzentrale. Abbildung 24 veranschaulicht einige Elemente der Entwicklungen zur Verbesserung der User Experience.

Das Fahrgastwohlbefinden adressiert Maßnahmen gegen Reisekrankheit, die hauptsächlich durch widersprüchliche sensorische Informationen verursacht wird. Die Wellbeing-Funktion bietet eine Lösung für die mangelnde Vorhersehbarkeit der bevorstehenden Bewegung des Fahrzeugs und versorgt die Passagiere mit visuellen und akustischen Gegenmaßnahmen, um Unwohlsein zu reduzieren. Eine im Projekt durchgeführte Studie mit N = 52 Probanden zeigte einen signifikanten positiven Einfluss der Gegenmaßnahmen in Bezug auf Reisekrankheit.

Zusätzlich wurden Funktionen des maschinellen Hörens integriert. Für die akustische Wahrnehmung von Sirenengeräuschen und Hilferufen wurde das Shuttle mit robusten Automobil-Akustiksensoren (ZF ProSound) ausgestattet. Wenn ein Geräuschereignis vom KI-basierten Algorithmus als Sirene oder Hilferuf identifiziert wird, reagiert das System automatisch und macht dem Einsatzfahrzeug Platz beziehungsweise informiert die Leitwarte, die sich per Sprachverbindung in das autoSHUTTLE dazu schalten kann.

Über den digitalen Cabin Manager wird eine gezielte adaptive Informationsübermittlung in diesen Ausnahmesituationen realisiert. Alle wichtigen Informationen werden über das 2-Sinne Prinzip sowohl visuell als auch akustisch dargestellt. Zusätzlich werden die Informationen auch über die App angezeigt, sodass die digitale Barrierefreiheit für sinneseingeschränkte Personen gewährleistet wird. Potenzielle Nutzende wurden im iterativen Entwicklungsprozess an mehreren Stellen in die Konzeption eingebunden. So wurden im Laufe des Projekts ein Workshop, ein Interview, drei Onlinestudien, eine Realfahrtstudie sowie eine finale Abschlussevaluation zum Cabin Manager durchgeführt.

Im Rahmen der Abschlussveranstaltung wurden alle entwickelten Funktionen erfolgreich demonstriert und fanden bei Besuchern großen Anklang.



Abbildung 25: Im autoSHUTTLE wurden verschiedene Funktionen zu maschinellem Hören, digitaler Barrierefreiheit und Fahrgastwohlbefinden integriert und getestet.

Beiträge der beteiligten Projektpartner:

Das **Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen** verantwortete die Entwicklung des digitalen Cabin Managers, wobei im Rahmen der nutzerzentrierten Gestaltung eine Reihe an Studien durchgeführt wurden. Zunächst wurden im Herbst 2023 sechs Workshops mit insgesamt 28 Versuchspersonen unterschiedlicher Beeinträchtigungen durchgeführt. Es zeigte sich, dass Personen im Ruhestand eine ausschließliche Informationsdarstellung auf den Displays im Shuttle wünschen, während alle anderen Gruppen eine Informationsdarstellung auf Displays oder persönlichem Endgerät wünschten. Die benötigten Informationen waren über alle Gruppen weitgehend gleich. Die anschließende Entwicklung wurde von einer Expertenbefragung von 8 Personen unterschiedlicher Beeinträchtigungen im Sommer 2024 begleitet. Durch das dabei gesammelte Feedback konnten App und Anzeigen iterativ verbessert werden. Im Sommer 2025 wurde eine Onlinestudie mit insgesamt 104 Personen durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass ein weiblicher Avatar, der als Schnittstelle zu einer Leitwarte in kritischen Situationen dient, als wärmer wahrgenommen wurde als ein androgyner und ein männlicher Avatar. Parallel wurde eine Realfahrtstudie mit 95 Versuchspersonen durchgeführt. Die Ergebnisse bestätigen, dass durch gezielte Information von Insassen während kritischer Situationen während einer automatisierten Fahrt Vertrauensverluste abgefangen werden können. Zuletzt wurde der Cabin Manager in einer Abschlussevaluation mit 18 Versuchspersonen verschiedener Beeinträchtigungsgruppen geprüft. Insgesamt wurde die Gestaltung der App weitgehend positiv bewertet und kommentiert. Einzelne Funktionen wie die Haltestellenanzeige, die Sitzplatzanzeige oder Informationen zu auftretenden Fehlern hatten Verbesserungspotenziale, weil sich Personen noch mehr genauere Informationen gewünscht hätten.

Zusätzlich wurde durch das ika ein System für die Sprachinteraktion zwischen autoSHUTTLE und Benutzern von außen entwickelt. Dazu gehörte ein Offline-Spracherkenner (Whisper in ROS2) und Sprachfeedback über eine speziell entwickelte externe Verstärkerkette mit Lautsprechern, 3D-gedruckten Gehäusen und Leistungskomponenten. Messungen in der halb-echofreien Kammer des ikas evaluierten verschiedene Mikrofonpositionen unter unterschiedlichen Bedingungen (Körpergröße, Umgebungsgeräusche, Fahrzeugzustand). Die Ergebnisse bestätigten die Praktikabilität der Lösung.

Die **ZF Friedrichshafen AG** brachte in diesem Arbeitspaket mehrere Anwendungsfälle ein, welche bei der Abschlusspräsentation erfolgreich in dem autoSHUTTLE präsentiert wurden. Zur Zielerreichung wurden hierzu, in Zusammenarbeit, die Anforderungen an die Funktionen fortlaufend mit den anderen Arbeitspaketen AP 2.1, AP 3.4 und AP 6.2 abgestimmt. Weiter wurde für den Anwendungsfall Wellbeing eine Probandenstudie durchgeführt, um hieraus effektive Gegenmaßnahmen zur Reduzierung einer Reisekrankheit, welcher über die Metrik (MSI – Motion Sickness Index) bestimmt wird, zu definieren. Aus diesen Arbeiten und der Analyse der Ergebnisse wurde ein Patent angemeldet, um auf Basis der geplanten Trajektorieninformation geeignete Gegenmaßnahmen durch Licht und Ton einzuleiten. Für den Anwendungsfall Sirenenerkennung wurden die notwendigen Systemkomponenten in das autoSHUTTLE integriert und für die Hilferuferkennung optimale Einbaupositionen der Mikrofone in dem autoSHUTTLE eingemessen und definiert. Bei den Arbeiten aus AP 7.1 ist insbesondere hervorzuheben, dass hier eine interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen den Arbeitspaketen AP 2.1, AP 3.4 und AP 7.1 stattgefunden hat. Dies wird auch in Zukunft von hoher Relevanz sein, um diensteorientierte Architekturen zu entwickeln und Funktionen als Dienst anbieten zu können. Die Sirenenerkennung war neben der Vernetzung des autoSHUTTLEs eine wichtige Funktion für die Abschlusspräsentation, um das Rettungsfahrzeug zu erkennen und Vorrang zu gewähren. Die Hilferuferkennung wurde mit Gegensprechfunktion eindrucksvoll präsentiert und Schnittstellen zur Umsetzung der Sprachbedienung von der RWTH über die eingebauten Mikrofone bereitgestellt. Alle durchgeführten Arbeiten waren für den Projekterfolg entscheidend, um eine erfolgreiche Abschlusspräsentation sicherzustellen.

2.7.2 AP 7.2: Effizienter Warentransport

Das AP 7.2 umfasste das Flottendesign und -management sowie die bidirektionale Materialübergabe zwischen einem Autonomen Mobilen Roboter (AMR) und dem autoCARGO.

Flottendesign und –management: Für ein auf autoCARGO und AMR basierendes Belieferungskonzept können verschiedene Betriebsstrategien eingesetzt werden. Es wurden verschiedene Betriebsstrategien identifiziert, formalisiert und als mathematische Optimierungsmodelle implementiert sowie heuristische Lösungsverfahren entwickelt. Zudem wurden im Rahmen des Projekts Simulationsmodelle entwickelt und implementiert, die es ermöglichen, die verschiedenen Betriebsstrategien zu analysieren und zu visualisieren. Dabei wurden zum einen abstrahierte Szenarien, zum anderen aus Realdaten abgeleitete Szenarien herangezogen. Anhand der Ergebnisse konnte die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Betriebsstrategien hinsichtlich Kosten und Lieferdauer in Abhängigkeit verschiedener Parameter wie der Kosten von autoCARGO und AMR sowie verschiedener räumlicher Verteilungen der zu beliefernde Standorte evaluiert werden.

Materialübergabe: Im Projekt wurden die Schnittstellen und der Datenaustausch für die Materialübergabe zwischen dem AMR und dem System autoCARGO definiert, um ein Rendezvous der Fahrzeuge zu ermöglichen. Zudem wurden die Anforderungen für das Mock-up des Übergabemoduls festgelegt. Das AMR navigiert selbstständig zur Zielpose am autoCARGO. Dort überprüft autoCARGO mithilfe einer Kamera und Pose-Estimation die Erreichbarkeit des AMRs. Bei Abweichungen wird eine Korrekturpose berechnet und übermittelt. Anschließend fährt die vertikal verfahrbare Plattform des Mock-ups in Arbeitsposition, um Pakete mit dem Roboterarm ein- oder auszulagern. Nach Abschluss der Übergabe wird der Vorgang an das AMR rückgemeldet, das zur nächsten Zielposition fährt. Das Mock-up ermöglicht durch eigene Recheneinheit und Energieversorgung einen plattformunabhängigen Einsatz und ist cloudfähig. Der erfolgreiche Prozess wurde im Rahmen des Final Events demonstriert.



Abbildung 26: Das autoCARGO bei der Paketübergabe an den AMR mit dem Mockup.

Beiträge der beteiligten Projektpartner:

Das **Institut für Fördersysteme und Logistik des Karlsruher Instituts für Technologie** war als einziger Partner an diesem AP beteiligt.

2.7.3 AP 7.3: Aktive Sicherheit für VRU und Leichtfahrzeuge

Das AP 7.3 umfasste die Entwicklung einer App zum Schutz von verletzlichen Verkehrsteilnehmern, insbesondere Fußgängern, Fahrradfahrern und Leichtfahrzeugen. Die App ist über projektübergreifende Schnittstellen, insbesondere die ETSI V2X Datenformate, mit dem digitalen Zwilling verbunden. Eigene Informationen werden darüber bereitgestellt und das Abbild des Verkehrs bezogen. Ein Backend generiert spezifische Warnungen für alle Nutzer, sofern diese in eine kritische Situation geraten. Zusätzlich können andere im digitalen Zwilling präsente Warnungen, wie etwa die Präsenz einer Straßensperre oder eines Einsatzfahrzeuges, dargestellt werden. Die App wurde außerdem mit dem Bio-Hybrid-Fahrzeug “E-Jet" verbunden. Wenn dieser eine Warnung erhält, wird der Fahrer (neben den grundsätzlich verfügbaren Kanälen über Bild, Ton und Vibration) durch eine Motorbremse alarmiert.

Die App wurde mit dem E-Jet erfolgreich in Demo 8 auf der Abschlussveranstaltung gezeigt, in der zusätzlich die in AP 5.2 entwickelten mobilen Messstationen zum Einsatz kamen, um den digitalen Zwilling an entscheidenden Stellen mit Daten anzureichern. Außerdem diente als Challenger-Fahrzeug ein VW ID.3, der serienmäßig ETSI V2X Nachrichten schickt und damit ebenfalls im digitalen Zwilling zu sehen ist. Dies unterstreicht die Relevanz der entwickelten Konzepte über die reine Forschung hinaus.

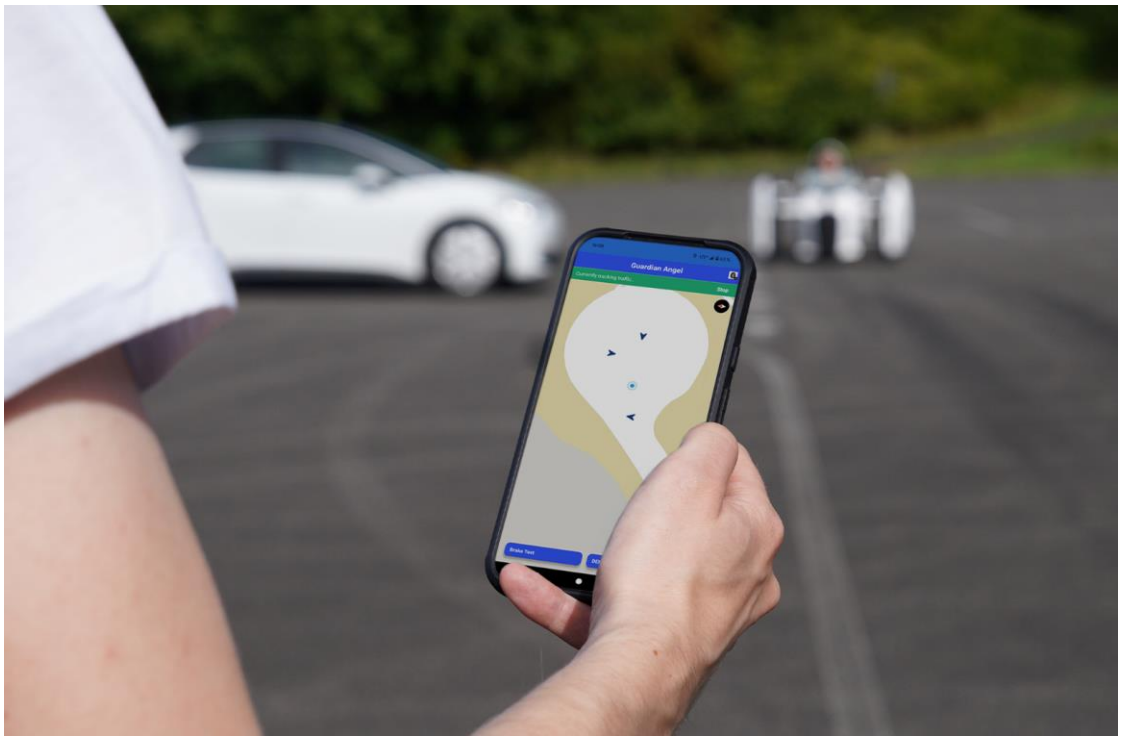


Abbildung 27: Der Guardian Angel kann Fußgängern Zugang zum digitalen Zwilling ermöglichen, aber auch bspw. den im Hintergrund stehenden E-Jet bei Warnungen abbremsen

Beiträge der beteiligten Projektpartner:

Das **Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen** war als einziger Partner an diesem AP beteiligt.

3 Eingesetzte Ressourcen und Angemessenheit der Projektarbeiten

Der genaue Einsatz der erhaltenen Zuwendung zur Finanzierung von Personal- und Sachausgaben kann den zahlenmäßigen Nachweisen der Projektpartner entnommen werden. Diese liegen dem Fördergeber vor. An dieser Stelle soll herausgestellt werden, welche Positionen für den Projekterfolg von besonderer Bedeutung waren und bewertet werden, inwiefern die geleisteten Projektarbeiten angemessen und notwendig waren.

Partner	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten
RWTH	Für den Projekterfolg waren insbesondere Personalausgaben entscheidend und machten den größten Teil der Zuwendung aus. Die Sachmittel wurden überwiegend für den Erhalt und die Erweiterung der eingesetzten Infrastruktur (Fahrzeuge und Messstationen) sowie zum Aufbau von Demonstratoren eingesetzt. Außerdem war die Durchführung der Abschlussveranstaltung ein wesentlicher Kostenfaktor.	Die vielfältigen Projektarbeiten konnten nur mit in ausreichender Anzahl verfügbarem qualifiziertem Personal erreicht werden. Für eine Erprobung und Demonstration der erforschten Konzepte waren insbesondere die eingesetzte Infrastruktur aber auch weitere Demonstratoren essenziell. Die durchwegs positive Resonanz der Besucher aus Presse, Fachpublikum und allgemeiner Öffentlichkeit bekräftigten die Angemessenheit der durchgeführten Abschlussveranstaltung, die einen wesentlichen Beitrag zur Sichtbarkeit und Verstetigung der Projektergebnisse leistete.
TUBS	Für den Projekterfolg waren insbesondere Personalausgaben entscheidend und machten den größten Teil der Zuwendung aus. Hinzu kamen Sachmittel für den Aufbau eines Demonstrator-Systems zur praktischen Umsetzung der Projektergebnisse.	Die geleisteten Projektarbeiten waren notwendig, um die Herausforderungen serviceorientierter Architekturen in sicherheitskritischen Mobilitätssystemen zu adressieren. Ausgehend von Herausforderungen der Operationsdomäne konnten verschiedene Sicherheitsaspekte der Technik und im Projekt adressiert werden. Essentiell für die im Projekt erzielte Überführung von theoretischen Konzepten in die industrielle Praxis war die Umsetzung des Demonstrators mit industriellen Werkzeugen gemäß dem Industriestandard AUTOSAR. Insbesondere das modulare Laufzeitmonitoring trägt wesentlich zur Betriebssicherheit und Adaptivität bei. Die entwickelten Konzepte sind technisch angemessen und anschlussfähig an bestehende Systemarchitekturen. Der Demonstrator zeigt die praktische Umsetzbarkeit. Die Einbindung aller wesentlichen Ergebnisse der TU Braunschweig in internationale Fachdiskurse bzw. -konferenzen belegt zudem die fachliche Relevanz der Ergebnisse.
TUDA	Die größte Position stellen die Gehälter aller am Projekt beteiligten Beschäftigten dar, da die Hauptergebnisse aus Methoden- und Konzeptentwicklungen sowie Programmierung, Testdurchführung und Inbetriebnahme stammen. Die zweitgrößte Position ist die Beschaffung von Sensorik und Rechenhardware, die zur Applikation der exemplarisch entwickelten NGF	Auf dem Abschlussevent wurde gezeigt, dass die von der TUDA geleistete Arbeit im Projekt notwendig und erfolgreich war. Exemplarisch wurde die entwickelte NGF sowie deren Integration und Applikation auf autoELF demonstriert. Ebenso wurden die Arbeiten zum robusten, integren und selbstbewertenden Lokalisierungsmodul mit komplementärer Sensorik

	auf der autoELF notwendig ist. Neue Sensorik war notwendig wegen veränderten Anforderungen an das Field of View durch die Spezialisierung auf den Nahbereich. Neue Rechenhardware war notwendig, weil vorhandene Rechenhardware teils veraltet ist und durch die Nutzung für den UNICARagil Software-Stack bereits ausgelastet ist. Zusätzlich wurde eine Event-based Camera für das neuromorphe Sensormodul beschafft. Dienstreisen trugen während der gesamten Projektlaufzeit zur notwendigen Abstimmung sowohl projektweit als auch zwischen einzelnen, inhaltlich abhängigen Partnern der TUDa bei. Insbesondere gegen Ende des Projekts waren darüber hinaus viele Dienstreisen für Test und Inbetriebnahme sowie Vorbereitung und Durchführung des Abschlussevents nötig.	(gemeinsam mit iMAR und KIT-MRT) erfolgreich vorgestellt. Im Bereich modularer Absicherung trug die TUDA zum Aufbau einer gemeinschaftlich nutzbaren Simulationsumgebung bei. Diese bildet die Grundlage für die synthetische Erzeugung und Beobachtung von erwünschtem und unerwünschtem System- und Modulverhalten und ist zentral für die Weiterentwicklung des Qualitätsvektorkonzepts und einer schnittstellenbasierten Absicherung. Darüber hinaus leistete sie Beiträge zur Bewertung und Optimierung von Perzeptionssystemen, zur Upgradefähigkeit elektronischer Systeme und zur Qualifizierung von Event-based Cameras.
KIT	Der überwiegende Teil der Projektmittel wurde für Personalkosten verwendet, um die erfolgreiche Durchführung des Projekts sicherzustellen. Der zweitgrößte Ausgabenposten entfiel auf die Beschaffung von Komponenten und Materialien für die Demonstratoren sowie auf Instandhaltungsmaßnahmen am System autoCARGO.	Beim Abschlussevent wurde in den verschiedenen Arbeitspakete mit der Beteiligung vom KIT demonstriert, dass die eingesetzten Ressourcen und der geleistete Aufwand angemessen waren und maßgeblich zum Erfolg der Projektteile beitrugen. Nur durch diesen Einsatz konnten die Demonstrationen erfolgreich präsentiert und die Projektergebnisse termingerecht fertiggestellt werden
TUM	Für den Projekterfolg waren Personalkosten entscheidend, welche den überwiegenden Anteil der Zuwendungen in Anspruch nahmen. Die Beschaffung von Komponenten und Hardware nahm eine untergeordnete Rolle ein. Wegen der umfassenden Zusammenarbeit im Projekt und der gemeinsamen Schnittstellen kam es insbesondere zum Projektende vermehrt zu Dienstreisen.	Mit der Leitzentrale als zentrale Instanz im Mobilitätssystem sowie den anbieterspezifischen Leitwarten und Testfeldern wurden von der Technischen Universität München maßgebliche Bestandteile des Projekts autotech.agil erarbeitet und in das Gesamtsystem eingebracht. Der geleistete Aufwand und die eingesetzten Ressourcen haben somit zum Projekterfolg beigetragen. Ergänzend wurden Rechenressourcen und datengetriebene Entwicklungsumgebungen für KI-basierte Anwendungen der intelligenten Infrastruktur ausgebaut und in das Projekt integriert.
UniS	Der weit überwiegende Teil der Ausgaben entfiel auf Personalkosten. Darüber hinaus wurden noch Investitionsgüter in signifikanter Höhe beschafft.	Da ein Großteil der Arbeiten auf dem Vorgängerprojekt UNICARagil aufbaute, wurde das Personal – soweit möglich – übernommen. Somit konnte eine zeitintensive Einarbeitung vermieden werden. Allerdings führt das zu einem leicht höheren Ausgabenniveau. Da alle Meilensteine erreicht wurden, wird dies jedoch als angemessen

		eingeschätzt. Um erhöhten Ausgaben auszugleichen, wurden Mittel an anderer Stelle eingespart. Die Investitionsgüter waren erforderlich, um die im Antrag beschriebenen Vorhaben durchführen zu können. Auch hier wurden die erhofften Ergebnisse erzielt, so dass auch dies Ausgaben als angemessen eingeschätzt werden.
UULM	Der größte Anteil der Zuwendung wurde für Personalkosten verwendet. Dies gewährleistete die Entwicklung für das Projekt relevanter, neuer Methoden und Konzepte. Des Weiteren wurden Mittel eingesetzt zur Anschaffung von Lidar-Sensoren für die Arbeiten in AP 4.2 und die Ausstattung des eingesetzten Versuchsträgers. Ein ebenfalls relevanter Anteil der Zuwendung floss in Reisekosten für Projektreffen, Konferenzen und die gemeinsamen Tests in Aldenhoven.	Die eingesetzten Mittel für die Personalkosten waren notwendig, um die neuen Konzepte zu entwickeln und ausführlich zu testen. Dabei wurden weniger Personalmittel benötigt als ursprünglich geplant. Die Anschaffung der Lidar-Sensoren war notwendig, um die Arbeiten im AP 4.2 und mit dem Versuchsfahrzeug durchführen zu können Die Reisen waren aufgrund von Projektabsprachen und zur Realisierung des Abschlussevents notwendig sowie zur Ergebnisverbreitung. Die Vielzahl der entstandenen wissenschaftlichen Publikationen im Rahmen des Projekts mit Beteiligung der Universität Ulm sowie die Beiträge zur Abschlussdemonstration zeigen dabei den Erfolg, der mit den eingesetzten Mitteln erreicht werden konnte.
UniP	Die Personalkosten machten den Großteil der Zuwendung aus. Von den Sachmitteln wurden vor allem Hardware zur Entwicklung und Evaluation der Forschungsarbeiten beschafft, die teilweise auf dem Demonstrator verbaut worden ist. Die Reisemittel dienten insbesondere der Teilnahme an Konsortialtreffen.	Die eingesetzten Personalkosten waren für die Erforschung neuartiger Security-Ansätze notwendig sowie zur deren prototypischer Umsetzung. Der Demonstrator, die Publikationen und die bewilligte Förderung zu einem EXIST-Forschungstransfer bezeugen die Nachhaltigkeit dieser Förderung.
FAU	Der überwiegende Anteil der Fördermittel wurde für Personalkosten eingesetzt, wodurch die Entwicklung und Umsetzung neuer, projektrelevanter Methoden und Konzepte ermöglicht wurde. Darüber hinaus wurden Investitionen in leistungsfähige Workstations mit GPUs getätigt, um die Durchführung und Evaluierung KI-basierter Verfahren sicherzustellen. Ein weiterer Teil der Mittel wurde für notwendige Reisekosten verwendet, insbesondere für Projekttreffen, Fachkonferenzen sowie für die Abschlussdemonstration in Aldenhoven.	Die im Projekt durchgeführten Arbeiten waren sowohl notwendig als auch angemessen, um die definierten Ziele zu erreichen. Die Entwicklung neuer Methoden und Konzepte für probabilistische Planung und modellprädiktive Regelung bildet die Grundlage für die sichere und robuste Fahrzeugführung. Die eingesetzten personellen Ressourcen sowie die Anschaffung leistungsfähiger Hardware waren erforderlich, um die komplexen KI-basierten Verfahren zu entwickeln, zu testen und zu validieren. Auch die durchgeführten Reisen für Projekttreffen, Konferenzen und Testaktivitäten trugen entscheidend zur erfolgreichen Umsetzung der Projektziele bei.
iMAR	Der überwiegende Teil der bereitgestellten Fördermittel wurde für Personalkosten verwendet und ermöglichte damit die Entwicklung und Umsetzung neuer, projektrelevanter Algorithmen sowie konzeptioneller Ansätze. Darüber hinaus erfolgten gezielte Investitionen den	Die erfolgreiche Realisierung der breit gefächerten Projektinhalte war nur durch den Einsatz einer ausreichenden Anzahl hochqualifizierter Fachkräfte möglich. Für die Erprobung und Validierung der entwickelten Konzepte spielte insbesondere das eingesetzte Sensorsystem, ergänzt durch zusätzliche

	mechanischen Aufbau, Sensorik, Fahrzeugrechner und die zugehörige Peripherie, um die Durchführung und Evaluierung der entwickelten Lokalisierungsverfahren sicherzustellen. Ein weiterer Teil der Mittel wurde für notwendige Reisekosten aufgewendet, insbesondere im Rahmen von Projekttreffen, Messkampagnen sowie für die abschließende Demonstrationsveranstaltung in Aldenhoven.	Demonstratoren, eine zentrale Rolle. Die äußerst positive Rückmeldung von Vertretern aus Presse, Fachwelt und Öffentlichkeit verdeutlichte die hohe Relevanz und Wirkung der Abschlussveranstaltung, die maßgeblich zur Sichtbarkeit sowie zur nachhaltigen Verankerung der erzielten Projektergebnisse beitrug.
INCYDE	Der Großteil der Zuwendungen ist für Personalkosten aufgewendet worden und ist in die Verbesserung der Sicherheitsarchitektur und des Sicherheitsmodells für kooperative intelligente Verkehrssysteme (C-ITS) im autotech.agil-Ökosystem geflossen. Insbesondere in die Erstellung der Automotive PKI.	Die geleisteten Projektarbeiten waren notwendig, um die Herausforderungen einer sicheren serviceorientierten Architektur aus Sicht der IT-Sicherheit zu adressieren. Insbesondere die Erstellung einer Implementierung einer automatisierten generischen PKI für verschiedenen Automotive Use-Cases (C-ITS, Services, EV-Charging) konnte erfolgreich demonstriert werden.
TC	Für den Projekterfolg waren insbesondere Personalausgaben entscheidend und machten den größten Teil der Zuwendung aus. Weiterhin wurde ein Server für die Live-Einbindung rechenintensiver Module angeschafft.	Die geleisteten Projektarbeiten waren nötig, um die Entwicklung eines offenen Ansatzes zur Qualifizierung von Open-Source-Softwaremodulen vorwettbewerblich und im Zusammenspiel mit verschiedenen im Projekt beteiligten Stakeholdern voranzutreiben. Ein solcher Ansatz stärkt langfristig den Wirtschaftsstandort Deutschland, da eine Abhängigkeit von Nicht-EU-Anbietern vermieden werden kann. Die positive Resonanz auf die zahlreichen internationalen Präsentationen des entwickelten Ansatzes zeigen die Relevanz und stützen den Einsatz der Fördermittel.
DSA	Für den Projekterfolg waren insbesondere Personalausgaben entscheidend und machten den größten Teil der Zuwendung aus.	Die geleisteten Projektarbeiten waren notwendig, um mit der Entwicklung einer durchgängigen Diagnosefähigkeit auf Dienstebene den Grundstein für eine zukunftssichere und skalierbare Diagnoseinfrastruktur zu legen, die den Anforderungen von SDVs gerecht wird und den Betrieb komplexer, verteilter Fahrzeugsysteme nachhaltig unterstützt. Dies konnte mit dem ASAM SOVD Server erfolgreich demonstriert werden.
IPG	Personalkosten, die überwiegend zur Entwicklung projektspezifischer Software-Schnittstellen und Module für die hauseigene Integrations- und Testplattform CarMaker verwendet wurden, waren maßgebend für die Erreichung der Projektziele. Diese wurden um Reisekosten zwecks regelmäßiger Abstimmungen auf Konsortialebene sowie Mitgestaltung der Abschlussveranstaltung ergänzt.	Geplante Projektarbeiten konnten nur mit ausreichendem Personaleinsatz geleistet werden. Somit wurden Entwicklungsaktivitäten in den Themengebieten des digitalen Zwillings, der kollektiven Funktionalitäten, der Homologationsprozesse sowie Methoden zur modularen Absicherung in enger Kooperation mit den Projektpartnern erfolgreich vorangetrieben.

MBC	Die Projektmittel wurden für Personalkosten verwendet. Diese waren notwendig, um Ressourcen für die Erarbeitung von Konzepten für die plattformübergreifende (AUTOSAR Classic und Adaptive) Abbildung sicherheitskritischer Wirkketten mit Hilfe von SL-LET inklusive Entwurf eines geeigneten Demonstrations-Use-Case zu ermöglichen.	Für die Umsetzung der Projektarbeiten sind Ressourcen in Form von Personal unabdingbar. Diese konnten im Projekt für die Erstellung eines Automotive Use-Case (Recuperation-Balancing) als sicherheitskritische Wirkkette über unterschiedliche AUTOSAR-Plattformen genutzt werden. Außerdem wurden Randbedingungen an die jeweiligen Plattformen sowie an die Entwicklungsprozesse mit Fokus auf Nutzung bereits bestehender Tools aus industrieller Praxis identifiziert. Die bestehenden Methoden wurden erweitert, um den Use-Case auch prozessual in praktizierten Entwicklungsprozessen nutzen zu können. Somit können die Erkenntnisse aus dem Projekt zielgerichtet im industriellen Umfeld eingeführt werden. Abschließend ist eine Konferenzveröffentlichung vor 06/2026 geplant und abzusehen.
Bosch	Der Großteil der Projektförderung entfiel auf Personalausgaben, welche zur Entwicklung einer umfassenden modellprädiktiven Regelung eingesetzt wurden und damit maßgeblich zum Projekterfolg betrugen.	Die geleisteten Projektarbeiten waren notwendig, um die Herausforderungen einer komponentenübergreifenden Fahrzeugregelung in modernen Mobilitätssystemen zu adressieren. Ausgehend von den Komplexitäten der Regelung konnten verschiedene Aspekte wie Systemdynamiken, Beschränkungen und Unsicherheiten umfassend behandelt werden. Insbesondere die modellprädiktive Regelung mit ihrer systematischen Optimierung trägt wesentlich zur Leistungsfähigkeit und Robustheit bei. Die entwickelten Konzepte sind technisch angemessen und anschlussfähig an bestehende und zukünftige Fahrzeugarchitekturen. Die umfassenden Simulationen und Tests belegen die praktische Umsetzbarkeit. Die erzielten Ergebnisse und deren Implikationen sind von hoher Relevanz für die Weiterentwicklung automatisierter und autonomer Fahrfunktionen.
Valeo	Die Zuwendung wurde fast ausschließlich für Personalaufwendungen verwendet.	Die geplanten Projektziele konnten nur durch entsprechende personelle Ressourcen erreicht werden. Hierzu zählen insbesondere die umfangreiche Aufnahme von Messdaten verschiedener Sensoren, die Erstellung von KI-Modellen und deren Training.
VI	Der überwiegende Teil der Projektmittel wurde für Personalkosten verwendet. Hierdurch konnte die erfolgreiche Durchführung des Projekts sichergestellt werden. Insbesondere die Definition eines Entwicklungsprozesses mit SL-LET und die Evaluation an einem praxisrelevanten Use-Case sind hier zu nennen.	Die geleisteten Projektarbeiten waren notwendig, um die Definition eines Entwicklungsprozesses für deterministische Cross-Plattform-Kommunikation mit SL-LET gemeinsam mit den Projektpartnern und Kunden zu erarbeiten. Insbesondere die Umsetzung eines Demonstrators an einem industrierelevanten Use-Case war von zentraler Bedeutung. Die erzielten Ergebnisse konnten die Übertragbarkeit auf

		praxisrelevante Tools und Prozesse nachweisen und eine Grundlage für die Anschlussfähigkeit schaffen.
VIR-HEX	Die Projektmittel wurden für Personalkosten verwendet, welche zur Entwicklung projektspezifischer Software-Schnittstellen für die Simulationssoftware Virtual Test Drive verwendet wurden. Außerdem wurden die Personalkosten verwendet, um die Automotive ASAM-Standards zu verbessern.	Die geplanten Projektarbeiten konnten nur mit ausreichendem Personaleinsatz geleistet werden. Somit wurden Entwicklungsaktivitäten und Standardisierungsaktivitäten in den Themengebieten des digitalen Zwillings erfolgreich durchgeführt.
VT	Der Großteil der Projektmittel wurde in Personalkosten investiert, um die erfolgreiche Umsetzung des Vorhabens sicherzustellen. Dadurch konnten zentrale Meilensteine erreicht werden – insbesondere die Ausarbeitung eines Entwicklungsprozesses unter Verwendung von SL-LET sowie dessen praxisnahe Validierung anhand eines relevanten Use-Cases, zu dem seitens VT ein Infineon AURIX TC39 Steuergerät zur Verfügung gestellt wurde.	Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Arbeiten waren essenziell für die gemeinsame Erarbeitung eines Entwicklungsprozesses zur deterministischen, plattformübergreifenden Kommunikation mittels SL-LET in Zusammenarbeit mit Projektpartnern und Kunden. Besonders hervorzuheben ist die Realisierung eines Demonstrators, der an einem industrierelevanten Use-Case verankert wurde. Die erzielten Ergebnisse belegen die Übertragbarkeit auf praxisnahe Werkzeuge und Prozesse und bilden zugleich eine fundierte Basis für die Integration in den Industriestandard AUTOSAR.
ZF	Zur Zielerreichung und Sicherstellung einer nachhaltigen Verwertung in Form von entstandenen Ergebnissen, Wissen, Publikationen oder Patenten waren die Personalkosten mit den zugehörigen Verwaltungskosten die größte Position. Die FE-Fremdleistungen sicherten die notwendige Expertise und die Umsetzung für die Funktionalitäten zur Projektzielerreichung. Die Kosten innerbetrieblicher Leistungen decken im Wesentlichen die Betriebskosten des HIL-Systems als Integrations- und Testumgebung.	Die eingebrachten Personalkapazitäten waren notwendig, um die AP-Ergebnisse zu erarbeiten und die Projektziele zu erreichen – wie u.a. auf der Abschlusspräsentation gezeigt. Hierbei lag insbesondere die Integration der ZF-Anwendungsfälle in das Zielsystem, sowie die Abstraktion (durch TSN/DDS, ONNX-Runtime und Plattformfunktion) von der zugrundeliegenden Plattform im Fokus. Durch die Verwendung der Projektmittel konnte in AP 2.1 Wissen über neue Systemarchitekturen aufgebaut werden und es existieren Architekturmodelle auf logischer, technischer und in AP 3.4 auf Softwareebene. Diese Arbeiten bildeten die Grundlage, um mit den Projektpartnern Konzepte wie den Qualitätsvektor und Systemschnittstellen zu erstellen. Das AP 2.2 sicherte mit dem Partner UniS-ILH über partnerschaftliche Zusammenarbeit die Vernetzung der Eco-X Komponenten. Die FE-Fremdleistungen sicherten die notwendige Expertise zur Probandenstudie für den Anwendungsfall Wellbeing, sowie zur Umsetzung der Hilferuferkennung für die Projektziele. Die Umsetzung der Testinstanzen wie Replay-SIL und HIL waren von entscheidender Bedeutung, um die Teile der Entwicklungskette durchzuspielen. U.a. war der HIL essenziell für das Konzept zur effizienten TSN-Konfiguration und die exemplarische Integration

		in Adaptive AUTOSAR. Der HIL war die wichtige Integrations- und Testinstanz in dem Projekt zur Vorbereitung der effizienten Systemintegration in das autoSHUTTLE.

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Projektergebnisse

Der in der Vorhabenbeschreibung initial durch die Partner aufgestellte Verwertungsplan ist in den jährlichen Sachberichten durch die Projektpartner fortgeschrieben worden. An dieser Stelle soll auf bereits erfolgte Verwertung sowie konkretisierte Verwertungspläne eingegangen werden. Zahlreiche Projektergebnisse sind bereits zur Projektlaufzeit im Rahmen wissenschaftlicher Veröffentlichungen der Fachcommunity sowie der allgemeinen Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt worden. Eine vollständige Auflistung der Veröffentlichungen ist in Kapitel 6.1 im Anhang dieses Berichts zu finden.

Partner	Nutzen und Verwertbarkeit der Projektergebnisse
RWTH	Die RWTH Aachen hat bereits im Rahmen der Projektlaufzeit zahlreiche Projektergebnisse im Rahmen von wissenschaftlichen Konferenz- und Journalbeiträgen sowie durch Projektpräsentationen auf diversen Veranstaltungen (u. a. VDI-Kongress ELIV und Aachen Colloquium) veröffentlicht. Einige im Projekt entstandene oder weiterentwickelte Softwarebausteine wurden als freie Open-Source-Software zur Verfügung gestellt. Durch Mitarbeit in relevanten Gremien (z. B. ETSI, ASAM) können Projektergebnisse in die Standardisierung einfließen. Außerdem konnte sowohl innerhalb des Konsortiums als auch darüber hinaus ein starkes Netzwerk aufgebaut werden, das eine solide Grundlage für nachfolgende gemeinsame Projekte bildet. Erste konkrete Projektvorschläge befinden sich in Ausarbeitung bzw. Beantragung. Darüber hinaus konnten zahlreiche Doktoranden und Studenten im Rahmen von wissenschaftlichen Arbeiten und Lehre in das Projekt eingebunden werden. Dadurch wird ein Beitrag zur Ausbildung von hochqualifiziertem wissenschaftlichem Nachwuchs geleistet, der die Projektergebnisse sowohl in die akademische Forschungslandschaft als auch die Industrie weiterträgt. Durch eine umfangreiche Öffentlichkeitsarbeit, u. a. über Social-Media-Kanäle, konnte die Öffentlichkeit an den Projektergebnissen teilhaben und es wurde bereits früh Sichtbarkeit für das Projekt geschaffen. Es wird angestrebt, die im Projekt entwickelten Konzepte im Rahmen von Ausgründungen und Forschungsaufträgen gemeinsam mit der Industrie weiterzuentwickeln.
TUBS	Die im Projekt entstandenen Ergebnisse zum Entwicklungsprozess mit SL-LET wurden planmäßig auf der ERTS 2026 als wissenschaftliche Veröffentlichung eingereicht. Auch für die Ergebnisse zur deterministischen Kopplung von signalbasierter und serviceorientierter Kommunikation sowie zur Verbesserung einer SL-LET Phasenmodellierung ist eine wissenschaftliche Verwertung geplant. Weiterhin bietet der im Projekt entstandene Demonstrator eine gute Grundlage für die Vermittlung von Systemdesign und -implementierung wie sie im industriellen Umfeld üblich ist. Ebenso kann der Umgang mit industriellen Werkzeugen in der Lehre vermittelt werden. Die im Projekt betrachteten Ansätze zur Analyse und Kommunikation von Sicherheit und Risiko haben Implikationen für den Stand der Forschung für den offenen Umgang mit Restrisiko des autonomen Fahrens, das unvermeidbar ist. Die Sicherheitsargumentation und daraus abgeleitete Artefakte als Kommunikationsmittel können das Zusammenspiel zwischen Funktionsentwicklung und Safety Engineering fördern. Die untersuchten und in wissenschaftlichen Publikationen dargelegten Dokumentations- und Formalisierungsansätze bieten Potenzial, die Strukturierung von Sicherheitsbetrachtungen an der Schnittstelle zwischen Technik und Gesellschaft zu erleichtern. Zudem wird die Zusammenarbeit mit dem Runden Tisch Autonomes Fahren, dessen Zwischenergebnisse ebenfalls einschlägig veröffentlicht werden konnten, als prägend und produktiv bewertet. Die im Projekt entwickelten Konzepte und Architekturen für eine modularisierte Laufzeitüberwachung haben hohes Potenzial für den praktischen Einsatz in zukünftigen Mobilitätssystemen. Sie ermöglichen eine verbesserte Absicherung servicebasierter Fahrzeugfunktionen und leisten damit einen Beitrag zur Sicherheit automatisierter Fahrzeuge. Durch die Fähigkeit zur dynamischen Anpassung an Störungen und Ausfälle können negativen Folgen perspektivisch reduziert und Systemverfügbarkeit erhöht werden.

	Die Referenzarchitektur ist dabei so gestaltet, dass sie auf unterschiedliche Fahrzeugplattformen und Dienste übertragbar ist. In der universitären Lehre können die entwickelten Frameworks und Demonstratoren genutzt werden, um Studierenden moderne Konzepte der Systemarchitektur, Fehlerbehandlung und Resilienz praxisnah zu vermitteln. Durch den Schwerpunkt des Instituts für Regelungstechnik sowohl auf der Regelungstechnik als auch auf dem automatisierten Fahren, bieten sich hier zahlreiche Potenziale.
TUDA	Die vernetzten Forschungsaktivitäten im Rahmen von autotech.agil boten exzellente Möglichkeiten für die innovative interdisziplinäre Forschung an Universitäten und neuartige Produkte mit Unternehmen und KMUs. Bereits zur Laufzeit des Projekts wurden über Vorlesungen und Übungen sowie die Betreuung von Abschlussarbeiten neueste Erkenntnisse aus dem Projekt an Studierende vermittelt, die darauf in ihren späteren Industrie- oder Wissenschaftskarrieren aufbauen können. Hierbei sind explizit folgende Vorlesungen zu nennen: ▪ „Trends in Automotive Engineering“ ▪ „Software Defined Vehicles“ ▪ „Fahrassistenzsysteme und automatisiertes Fahren“ Im Laufe des Projekts wurden Forschungsergebnisse in zahlreichen wissenschaftlichen Publikationen sowie Dissertationen veröffentlicht (siehe 7. Veröffentlichungen). Die Forschungsergebnisse können zu weiteren Kooperationen mit Unternehmen sowie Ausgründungen bzgl. der folgenden Themenfelder führen: ▪ Entwicklungs- und Beratungsdienstleistung im Bereich der effizienten Auswahl und Entwicklung von Use-Cases des automatisierten Fahrens bei niedrigen Geschwindigkeiten, insbesondere im Hinblick auf deren Nutzung zur schrittweisen Einführung des automatisierten Fahrens in den bestehenden Verkehr. ▪ Entwicklungs- und Beratungsdienstleistung im Bereich Homologation von KI-basierten Perzeptionsmodulen im automatisierten Fahren ▪ Entwicklungs- und Beratungsdienstleistung im Bereich der Upgradefähigkeit von elektronischen Systemen und der Bewertung und Optimierung von Perzeptionssystemen Im Rahmen diverser Bestrebungen wird versucht die im Projekt autotech.agil identifizierten Forschungsfragen in weiteren Forschungsarbeiten zu adressieren, u. a. mit dem Ziel des verstetigten Transfers der Forschungsergebnisse in die Automobilindustrie hinein und auch darüber hinaus.
KIT	Die vom KIT erarbeiteten Ergebnisse des Projektes flossen bereits während der Projektlaufzeit in mehrere internationale Publikationen ein. Weitere Publikationen sind in Vorbereitung. Insgesamt fünf Doktoranden haben im Projekt mit ihrer wissenschaftlichen Arbeit begonnen, zwei weitere haben ihre bereits zuvor begonnene Arbeit fortgesetzt. Wir erwarten in den kommenden 24 Monaten die Fertigstellung von fünf Dissertationen, die in wesentlichen Teilen auf Inhalten aus dem Projekt beruhen. Die wissenschaftlichen Ergebnisse gehen zudem in Lehrveranstaltungen am KIT ein, insbesondere in die Vorlesungen *Automotive Vision*, *Decision-Making and Motion Planning for Automated Driving, Automation and Autonomy in Logistics* sowie *Logistics and Supply Chain Management.* Die im Projekt entwickelten Softwarekomponenten für autonomes Fahren wurden in die Steuerungssoftware des autonomen Versuchsfahrzeugs am KIT-MRT integriert und werden dauerhaft Teil der Steuerungssoftware bleiben. Dieses Versuchsfahrzeug stellt die technische Basis für fortlaufende Forschung im Bereich autonomer Fahrzeuge dar. Es wird unter anderem im Forschungsprojekt *Safe AI Engineering* (Verbundprojekt mit Partnern aus der Automobilindustrie, gefördert durch das BMWE) sowie in einem Projekt der Auftragsforschung für einen deutschen Automobilhersteller genutzt. Weitere Forschungsprojekte, bei denen die Nutzung des Versuchsfahrzeugs geplant ist, befinden sich derzeit im Prozess der Anbahnung bzw. der Antragstellung. Die im Projekt entwickelten Logistikkomponenten sind dauerhaft in das Fahrzeug autoCARGO integriert worden und werden, wie auch der AMR, nach Projektende als Forschungsobjekte weitergenutzt werden.

	Anschlussprojekte zur Erweiterung der Arbeiten im Bereich autonomer Logistikkonzepte befinden sich in Planung.
TUM	Während der Projektlaufzeit präsentierte die TUM die auf der Projektarbeit basierenden Forschungsergebnisse auf zahlreichen nationalen und internationalen Konferenzen sowie in Fachzeitschriften. Die im Rahmen des Projekts gewonnenen technischen Erfahrungen und Teilergebnisse (z. B. das KI-gestützte Verkehrsüberwachungssystem und die entsprechenden aufgezeichneten Daten) dienten darüber hinaus als Grundlage für technologische Beratungen der bayerischen Landesbehörden (z. B. Verkehrsplanung) und lieferten wertvolle Impulse für zukünftige Verkehrsentwicklungen und Ausbauplanungen. Im Hinblick auf die interne Entwicklung konnten zwei am Projekt beteiligte wissenschaftliche Mitarbeiter ihre Promotion erfolgreich abschließen. Eine der Dissertationen wurde mit dem Best Dissertation Award 2025 der IEEE ITSS Society ausgezeichnet und trug damit wesentlich zur internationalen Sichtbarkeit und Anerkennung der wissenschaftlichen Beiträge von autotech.agil bei. Darüber hinaus beteiligten sich zahlreiche Master- und Bachelorstudierende im Rahmen von Werkstudententätigkeiten und Abschlussarbeiten an den Forschungsarbeiten des Projekts. Dies trug maßgeblich zur Ausbildung hochqualifizierter Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler bei, die die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse sowohl in der akademischen Forschung als auch in der Industrie weitertragen werden.
UniS	Die erarbeiteten Forschungsergebnisse wurden bereits während der Projektlaufzeit veröffentlicht. Einzelne abschließende Betrachtungen wurden bzw. werden im Rahmen von Dissertationen der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Es konnten mehrere Promotionsvorhaben, die bereits im Vorgängerprojekt UNICARagil begonnen wurde, zu einem erfolgreichen Abschluss gebracht werden. Ebenso wurden studentische Arbeiten betreut. Einige der im Projekt erarbeiteten Erkenntnisse sind bereits in die Gestaltung von Praktikumsversuchen eingeflossen. Darüber hinaus wurden Vorlesungsinhalte erweitert.
UULM	Die neuen Konzepte und Methoden, die vom Institut MRM der UULM im Laufe des Projekts entwickelt wurden, wurden bereits während der Projektlaufzeit als Publikationen bei renommierten Konferenzen und Journals eingereicht und angenommen. Wissenschaftliche Veröffentlichung stellen nicht nur eine gute Möglichkeit dar, die im Projekt durchgeführten Arbeiten innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft zu präsentieren, sie bieten zusätzlich auch die Möglichkeit, das Projekt über den Rahmen des Konsortiums vorzustellen und zu bewerben. Einige im Projekt entstandenen Software-Module wurden zusätzlich durch Open-Source-Veröffentlichungen der Allgemeinheit zur Verfügung gestellt. Zudem sind diese Teil der in den Versuchsfahrzeugen und Infrastruktursensorik eingesetzten Verarbeitungsketten, die auch über das Projekt hinaus in weiteren Forschungsprojekten eingesetzt werden. Innerhalb des Projekts autotech.agil konnten mehrere Doktoranden ihren akademischen Weg fortführen. Während der Projektlaufzeit konnten einige Mitarbeiter ihre Dissertation fertig stellen und andere ihren akademischen Weg als neue Doktoranden starten. Auch studentische Projekte/Abschlussarbeiten wurden im Rahmen des Projekts durchgeführt, wodurch das Projekt auch direkt zur Ausbildung neuer Fachkräfte beigetragen hat. Schließlich bilden Ergebnisse aus den Forschungsarbeiten auch die Grundlage für weitere Forschungsvorhaben, wie beispielsweise das Projektvorhaben CONTROL, in dem mit stärkerer Beteiligung der Industrie die Ansätze zur Selbstbewertung zur Absicherung automatisierter Fahrfunktionen im Automobil- und Bahnbereich weiterentwickelt und eingesetzt werden sollen.

UniP	Das Projekt autotech.agil hat zu einem umfassenden Kompetenzaufbau im Bereich sicherer, software-definierter Fahrzeuge an der Universität Passau geführt. Neben zwei abgeschlossenen Promotionen sowie zahlreichen Bachelor- und Masterarbeiten wurde ein Antrag zur Kommerzialisierung der Forschungsergebnisse in Kooperation mit der RWTH Aachen erfolgreich bewilligt. Der Nutzen des Projekts zeigt sich sowohl im wissenschaftlichen als auch im wirtschaftlichen Bereich: Es stärkt die Ausbildung zukünftiger Fachkräfte im Bereich Automotive Software Security und hat den Grundstein für die Gründung eines Unternehmens gelegt, das langfristig neue Arbeitsplätze schafft und zur Stärkung des Industriestandorts Deutschland beiträgt.
FAU	Die Arbeiten am Lehrstuhl für Regelungstechnik der FAU Erlangen-Nürnberg haben Methoden zur probabilistischen Trajektorienplanung und zur Absicherung KI-basierter Vorhersagen hervorgebracht, die eine zuverlässige Modellierung der Umgebungsdynamik ermöglichen. Diese Ergebnisse sind direkt in weitere Forschungsprojekte übertragbar und bieten Potenzial für industrielle Anwendungen. Bereits während der Projektlaufzeit wurden mehrere Publikationen in hochrangigen Konferenzen und Fachzeitschriften veröffentlicht, wodurch die wissenschaftliche Relevanz und Sichtbarkeit der Arbeiten sichergestellt sind. Durch die Einführung von Qualitätsvektoren zur Bewertung der Vorhersagegenauigkeit wird die Verwertbarkeit der Ergebnisse weiter erhöht.
iMAR	Da hohe Automatisierungsgrade bei Landfahrzeugen grundsätzlich eine verlässliche Absicherung der GNSS-basierten Lokalisierung erfordern, wird erwartet, dass die im Rahmen dieses Projekts entwickelten technologischen Kompetenzen sowie die im Zuge der umfangreichen Feldversuche gewonnenen Erkenntnisse mittelfristig eine zentrale Grundlage für die Entwicklung und Realisierung marktfähiger Lösungen bilden. Diese Lösungen können insbesondere beim szenarienbasierten Testen und Validieren hochautomatisierter Fahrfunktionen in GNSS-denied-Umgebungen zum Einsatz kommen und damit einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit im Straßenverkehr leisten. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass sich die entwickelten Konzepte und Verfahren aufgrund ihrer modularen Struktur und ihrer flexiblen Architektur mit vergleichsweise geringem Anpassungsaufwand auf unterschiedliche industrielle Anwendungen und spezifische Einsatzszenarien übertragen lassen. Das im Projekt entstandene Bild- und Videomaterial der erzielten Ergebnisse und Demonstrationen stellt dabei ein wertvolles Kommunikations- und Präsentationsinstrument dar, das auch über das Projektende hinaus zur Vermittlung der Technologiepotenziale gegenüber Endanwendern, Industriepartnern und potenziellen Kunden genutzt werden kann.
INCYDE	Durch das Projekt hat die INCYDE neue Fähigkeiten und Angebote an die Industrie erarbeitet. Die entwickelten Konzepte (A-PKI-Architektur, Schnittstellenspezifikationen, Tooling zur ETSI-konformen Schlüsselzertifizierung) sind direkt verwertbare Vorlagen zur Implementierung zukunftssicherer Cyber-Security-Lösungen in neuen Fahrzeugplattformen und C-ITS-Diensten. Hierzu zählte auch die detaillierte Analyse des Schlüssel-Lebenszyklus und die Implementierung eines OCSP-Responders ermöglichen den effizienten, sicheren und datenschutzkonformen Betrieb der notwendigen kryptografischen Infrastruktur. Die wissenschaftliche Veröffentlichung bei der ICISC 2024 demonstriert die Übertragbarkeit und den wissenschaftlichen Wert der Projektergebnisse über das Konsortium hinaus und sorgt für eine weitere Sichtbarkeit der Kompetenzen der INCYDE.
TC	Durch die Projektergebnisse kann die TC die angestrebte Qualifizierung von Open-Source-Software für das automatisierte Fahren in Deutschland weiter vorantreiben. Das entwickelte Framework bildet die Basis für die zukünftige Sammlung von relevanten und qualitativ hochwertigen Komponenten für das automatisierte Fahren und kann potenziell weitere Entwicklungen des Projekts inkludieren. Sie bietet sowohl kleinen Unternehmen, Startups als auch etablierten OEM und Tier I einen Anlaufpunkt zur Identifikation relevanter Module, neuer Technologien oder die Bewertung der eigenen Software.

	Die Plattform ermöglicht die Annäherung der großen und innovativen Open-Source-Community und der etablierten Industrie, die den Bedarf an qualifizierbarer Software immer weiter steigert.
DSA	Die DSA hat Vorschläge zur Weiterentwicklung des ASAM SOVD-Standards erarbeitet und in die entsprechenden Arbeitsgruppen eingebracht, um die Diagnosefähigkeit serviceorientierter Architekturen nachhaltig zu verbessern. Parallel dazu wurden in Zusammenarbeit mit mehreren OEMs Studien durchgeführt, in denen die Diagnose von High-Performance-Computern untersucht und der Einsatz von OpenTelemetry für die Laufzeitüberwachung evaluiert wurde. Diese Arbeiten haben wertvolle Erkenntnisse für die praktische Umsetzung geliefert und bilden die Basis für zukünftige Serienprojekte. Darüber hinaus flossen die gewonnenen Erfahrungen in Beratungsprojekte ein, bei denen OEMs bei der Konzeption und Umsetzung moderner Diagnosearchitekturen unterstützt wurden. Die Projektergebnisse wurden außerdem im Rahmen von Fachvorträgen und Konferenzbeiträgen einem breiten Publikum aus Industrie und Forschung zugänglich gemacht, wodurch eine frühe Sichtbarkeit des Projekts erreicht wurde. Insgesamt konnte so ein direkter Wissenstransfer in die Industrie erzielt werden. Die erarbeiteten Konzepte sind inzwischen Teil der Produkt- und Technologie-Roadmap der DSA und werden in kommenden Kundenprojekten weiterentwickelt und erprobt.
IPG	Mit den Projektergebnissen kann IPG ihre international führende Stellung im Bereich des Fahrzeugsimulation weiter ausbauen. Die entwickelten Software-Schnittstellen und -Module für die Simulationsumgebung CarMaker zur Containerisierung und Virtualisierung (ROS 2 und V2X Interfaces, Docker Framework, vECU-Evaluation) können nach entsprechender Revision in das Produkt- und Dienstleistungsportfolio des Unternehmens übernommen und anschließend Kunden angeboten werden, sofern es die projekt- und partnerspezifischen Nutzungsrechte erlauben. Damit stehen die Projektergebnisse automatisch als neue Produkteigenschaften unter anderem dem weit verzweigten universitären Partnernetzwerk von IPG zur Verfügung. Dadurch wird einerseits das methodische Spektrum für grundlagenorientierte und angewandte Forschung erweitert sowie andererseits eine Basis für weitere Forschungskooperationen etabliert.
MBC	Aus Compliance-Technischen Gründen wird im öffentlichen Teil keine Aussage über konkrete Verwertungspläne der Ergebnisse des Projekts zur Verfügung gestellt. Die Ergebnisse sind jedoch zufriedenstellend und können, wie in Kapitel 3 bereits beschrieben in die industrielle Praxis überführt werden.
Bosch	Die Projektergebnisse finden direkte Anwendung in fortführenden Forschungsprojekten der Bosch Forschung und werden in enger Kooperation mit verschiedenen Bosch-Geschäftseinheiten weitergeführt. Darüber hinaus bieten die entwickelten Methoden erhebliches Potenzial für den Einsatz in weiteren sicherheitskritischen Anwendungen. Besonders im Automobilbereich können sie im autonomen Fahren oder bei der Regelung von Systemkomponenten wie Bremsen und Lenkungen zum Tragen kommen. Eine Übertragung der Konzepte auf andere Systeme des Bosch-Portfolios, wie Wärmepumpen oder mobile Arbeitsmaschinen, wird ebenfalls evaluiert. Dies unterstreicht die breite Anwendbarkeit und den hohen Innovationsgrad der Projektergebnisse.
Valeo	Im Rahmen des Projektes wurde eine erste Veröffentlichung mit dem Titel “OMAD (Optimized Multi-Sensor Cluster for Automated Driving) State of the art” geschrieben. Die Projektergebnisse führten zu neuen Methoden einerseits bei der Verbesserung der Perzeption als auch zur Verbesserung (Rauschreduzierung) von Sensorrohdaten. Im Rahmen des Projektes wurden Methoden entwickelt, mit denen verswchiedene Bodenbeschaffenheiten “Asphalt trocken/nass, Gravel, Gras, …) bestimmt werden können. Dies hat vielfältige Vorteile. Die Projektergebnisse werden in zukünftigen Serienprodukten voll genutzt werden. Die Ergebnisse werden zur Kosten- und Energieeffizienz der Sensorcluster beitragen. Die ergibt sich aus den Algorithmen

	für Rauscheliminierung und Studien über die Sensorinhalte (z. B. 10 anstatt 12 bit Auflösung) Beide Aspekte sind im Hinblick auf einen Massenmarkt, der dem Verbraucher ein erschwingliches, energie-optimiertes und damit auch umweltfreundliches automatisiertes Fahrerlebnis ermöglichen will, eine wichtige Voraussetzung.
VI	Die im Rahmen von autotech.agil gewonnenen Erkenntnisse und erzielten Projektergebnisse finden direkte Anwendung im Bereich der Embedded Software und Tool-Entwicklung bei Vector. Insbesondere durch die praxisnahe Demonstration der Anwendbarkeit von System-Level LET konnte die konsequente Weiterentwicklung im Vector-Portfolio vorangetrieben werden. Dies betrifft sowohl die Umsetzung in den MICROSAR Stacks als auch in der Davinci Toolchain. Die Anwendbarkeit in weiteren Produktlinien wird zurzeit evaluiert. Durch die Demonstration der Projektergebnisse, insbesondere dem entwickelten Workflow für Design- und Integrationsmodelle von SL-LET, können diese in laufende Kundenprojekte eingebracht werden.
VIR-HEX	Die Erkenntnisse und Entwicklungen, die in diesem Projekt gewonnen wurden, werden in das Produkt Virtual Test Drive integriert und dieses damit für den Markt gestärkt.
VT	Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse werden bei der Schaeffler AG in Kundenprojekten, bei denen der SL-LET Ansatz Verwendung findet, genutzt. Dadurch ist es möglich als kompetenter Partner der OEMs bei Design und Integration aufzutreten und die SL-LET Ansätze vom Entwurf bis zur Implementierung zu begleiten. Leider sind in dem AP die Themen hinsichtlich zeitdeterministischer Kopplung von AR-Classic und AR-Adaptive nicht zufriedenstellend behandelt worden.
ZF	Durch dieses Projekt konnten Wissen und Erfahrungen in dem Bereich neuer Systemarchitekturen und Technologien zu Software-definierten Fahrzeugen aufgebaut werden. Dies ist für den Bereich „zentrale Forschung- und Entwicklung“ ein wichtiger Beitrag, um so Mitarbeiter für die Zukunft „offenen Software- und Elektrik/Elektronik-Architektur“ vorzubereiten. Die Konzepte aus den unterschiedlichen Arbeitspaketen wurden auf der ELIV-Konferenz im Jahr 2024 erstmalig präsentiert und bei der Abschlusspräsentation eindrucksvoll fertiggestellt. Durch die Vernetzung mit Projektpartnern und externen Dienstleistern konnten bereits vorangegangene Arbeiten vertieft und ergänzt werden. Hierbei ist insbesondere das Qualitätsvektorkonzept, die Systemintegration, sowie Konzepte zur Plattformabstraktion hervorzuheben. Diese Ergebnisse werden zur weiteren Forschung in den FEDERATE-Projekten wie HAL4SDV und Shift2SDV ins Auge gefasst. Aus der Konzeptentwicklung für die Anwendungsfälle sind Ergebnisse entstanden, welche in nachfolgenden Kundenprojekten eingebracht und angepasst werden können. Darüber hinaus wurde die Sichtbarkeit der Konzepte und Zusammenarbeit mit Partnern und Projekten auf der ELIV-Konferenz am 16.10.2025 erhöht. Somit kann das erlernte Wissen in internen oder auch externen Förderprojekten weiter genutzt werden.

5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Das Projektkonsortium beobachtet fortlaufend die Forschung und Entwicklung im Themenfeld des automatisierten und vernetzten Fahrens, insbesondere im Hinblick auf die im Vorhaben adressierten Schwerpunkte. Nachfolgend wird eine Übersicht über den relevanten Fortschritt in den Themengebieten der Projektpartner gegeben.

Partner	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen
RWTH	Auch wenn das Thema bei einigen Unternehmen aus wirtschaftlichen Gründen in den Hintergrund gerückt ist, forschen immer noch zahlreiche andere Projekte sowie einige nationale und internationale Unternehmen auf dem Gebiet des automatisierten und vernetzten Fahrens. Während beispielsweise Waymo und Zoox in den USA sowie einige Unternehmen in China bereits mit umfangreichen autonomen Fahrzeugflotten auf öffentlichen Straßen im Betrieb sind, bleibt die Skalierung in Europa über einen Pilotbetrieb hinaus derzeit noch aus. Um eine solche zu erreichen, liegt der politische und unternehmerische Fokus in Europa derzeit auf der Verbesserung der Kollaboration zur gemeinsamen Schaffung einer nicht-differenzierenden Basis für autonome Fahrzeuge. In den EU-Projekten HAL4SDV und Shift2SDV wird, organisiert durch das Koordinationsprojekt FEDERATE, an einer gemeinsamen Hardware- und Softwarebasis gearbeitet. Mit Eclipse S-CORE gibt es bereits ein erstes unternehmensübergreifendes Open-Source-Projekt zur Schaffung einer offenen Kommunikationsschicht, deren Entwicklung inzwischen signifikant vorangeschritten ist. Die Projektleitung war kontinuierlich im Austausch mit den Projektleitungen der genannten Projekte, um Projektergebnisse dort einfließen zu lassen und das Vorgehen zu synchronisieren. Die in autotech.agil erforschte Software-Architektur, Entwicklungswerkzeuge sowie Funktionsbausteine gehen außerdem über den aktuellen Stand der Forschung hinaus und erweitern den Blick von der Kommunikationsschicht auf das vernetzte und automatisierte Gesamtsystem inklusive aller relevanter Funktionsbausteine. Hier konnten wertvolle Vorarbeiten, u. a. in Form von Open-Source-Software, für eine anschließende Nutzung in anderen Projekten geschaffen werden.
TUBS	Auf dem Gebiet des automatisierten und vernetzten Fahrens zeigen sich zahlreiche Fortschritte, die auch für das vorliegende Vorhaben relevant sind. Unter anderem hervorzuheben ist das Projekt ATLAS-L4, in dem ein hochautomatisierter Lkw für den Einsatz auf der Autobahn entwickelt wurde. Das Projekt endete im Juni 2025 und begleitete das Projekt autotech.agil also lange Zeit parallel. Themen wie Architekturen, Self-Awareness-Mechanismen und Sicherheitsanalysen spielten ebenfalls eine große Rolle. Das Institut für Regelungstechnik begleitete beide Projekte. Als ein wesentliches Element der Risikoanalyse automatisierter und vernetzter Mobilitätssysteme sind Szenarien stark in den Vordergrund gerückt. Im Bereich der szenarienbasierten Absicherung wurden zahlreiche Ansätze und Innovationen zur Automatisierung bekannt. Zudem waren mehrere einschlägige Regulierungsaktivitäten auf nationaler und europäischer Ebene festzustellen, etwa bezüglich KI-Anwendungen. Hinsichtlich der Laufzeitüberwachung gibt es zahlreiche Innovationen in einschlägigen Zeitschriften und auf Konferenzen zu beobachten. Besonders stark entwickelt hat sich der Trend zur automatischen Generierung von Monitoren aus Modellen. Neue Frameworks (z. B. GRuM) erlauben es, Überwachungskomponenten direkt aus Systembeschreibungen abzuleiten und bei Änderungen automatisch anzupassen. Das reduziert manuelle Anpassungsarbeiten und erhöht die Flexibilität. Ein zweiter Fortschritt betrifft die Skalierbarkeit: Graphische Modelle spielen hier eine zunehmende Rolle. Durch sogenannte verteilte Graph-Abfragen können auch große, komplexe Systeme in Echtzeit überwacht werden. Gleichzeitig zeigen neue Ansätze zur mehrstufigen Überwachung, wie man Systemzustände auf mehreren Ebenen parallel überwacht – vom einzelnen Sensor bis zur Gesamtsystemsicht. Graphische Ansätze eignen sich auch für die Modellierung von Abhängigkeiten

	hinsichtlich der Güte von Systemteilen (wie Services), sodass auch aktuelle Ansätze wie Graph Neural Networks, zu denen im Projektzeitraum viele Publikationen stattfanden, zu nennen sind. Letztlich stellt auch die zunehmende Verbindung von Safety- und Security im Hinblick auf das Monitoring eine Innovation dar, die in Folgeprojekten weiter untersucht werden sollte, da hier häufig dennoch keine integrierten Ansätze vorliegen.
TUDA	Während der Laufzeit des Projekts autotech.agil, sind diverse Publikationen zur Anwendung von Spikenden Neuronalen Netzen in der Perzeption veröffentlicht worden. Im Bereich neuromorpher Prozessoren gab es einige einschlägige Veröffentlichungen, darunter die Entwicklung der Systeme PAICORE, SENECA, IBM NorthPole, SpiNNaker2, SNPU und BrainScaleS-2. Auf dem Markt befindlich hat sich neben BrainChip mit seinen AkidaBoards auch Synsense mit den Chips Speck und Xylo etabliert. Nennenswert ist außerdem die Entwicklung von Intels Hala Point. Im Bereich Event-based Cameras ist auf die Nutzung weiterer Hersteller von Chips, die in Zusammenarbeit mit Prophesee entstanden sind hinzuweisen, sowie neue Produkte von Prophesee die während der Projektlaufzeit entstanden sind. Auch die Algorithmik zur Verarbeitung von Event-based Camera Daten hat während der Durchführung des Vorhabens Fortschritte erlebt.
KIT	Im Bereich der Selbstlokalisierung für autonome Fahrzeuge sind während der Projektlaufzeit keine wesentlichen neuen Ansätze bekannt geworden. Weiterhin wird allgemein daran gearbeitet, verschiedene Sensoren, darunter GNSS, Inertialsensorik, Kameras, Lidar und ggf. Radar zu kombinieren, um zu einer robusten Lokalisierung zu kommen. Insofern spiegeln die Arbeiten innerhalb des Projektes sehr gut die allgemeinen Entwicklungen in diesem Gebiet wider. Der Bereich der kamerabasierten Umfeldwahrnehmung hat die Entwicklung immer leistungsfähigerer Transformer-Modelle die Erkennungsgüte und die Vollständigkeit der Erkennung stetig verbessert. Auch die Robustheit der Ansätze steigt dank zunehmend wachsender Datensätze und verbesserter Methoden. Innerhalb des Projektes wurden diese Entwicklungen aufgegriffen und die eigenen Ansätze dementsprechend erweitert und angepasst. Im Bereich der Verhaltenssteuerung für autonome Fahrzeuge ist weiterhin der klassische Zustandsautomat dominant, insofern hat sich gegenüber der Situation zu Projektbeginn keine wesentliche Veränderung ergeben. Im Bereich der Logistik hat sich die Entwicklung während der Projektlaufzeit ähnlich wie erwartet ergeben. Es werden sowohl in der Forschung als auch in der Praxis verschiedenste Ansätze entwickelt und getestet, um die Paketzustellung zu automatisieren und zu individualisieren, unter anderem durch den Einsatz von Robotern oder Drohnen. Die Vielfalt der unterschiedlichen Ansätze steht dabei in engem Zusammenhang mit unterschiedlichen denkbaren Anwendungsgebieten bzw. -szenarien. Dabei ist während der Projektlaufzeit kein Ansatz bekannt geworden, der für sämtliche Anwendungsgebiete bzw. -szenarien uneingeschränkt geeignet ist. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit und den Nutzen der im Projekt erarbeiteten und untersuchten Ansätze.
TUM	Im Projekt autotech.agil wurde die intelligente Verkehrsüberwachungsinfrastruktur am Münchener Testfeld weiterentwickelt. Zudem wurde ein auf dem autotech.agil-Framework basierender Plug-and-Play-fähiger Software-Stack entwickelt, der die standardisierte Übertragung von ETSI-CPM-Nachrichten ermöglicht und Verkehrsinformationen aus straßenseitigen Sensorsystemen cloudbasiert teilt. Parallel zum Projekt autotech.agil konnten die oben erzielten technischen Ergebnisse auch in weitere vom Bund geförderte sowie industriegeförderte Projekte wie VIDETEC-2 eingebracht werden. Auf dieser Basis wurde die Technologie der straßenseitigen Wahrnehmung erfolgreich auf neue Anwendungsfelder ausgedehnt, insbesondere auf die Erkennung von ungeschützten Verkehrsteilnehmenden (VRU) sowie auf die Fahrzeug-Infrastruktur-Kooperation (V2I-Cooperation). Damit entstand eine technologische Synergie zwischen autotech.agil und diesen Forschungsinitiativen, die den Transfer der

	Projektergebnisse in aktuelle wissenschaftliche und industrielle Anwendungsszenarien wesentlich fördert.
UniS	Ein Großteil der Arbeiten basiert auf dem in UNICARagil erarbeiten Ansatz der diensteorientierten Softwarearchitektur ASOA. Bzgl. der unterbrechungsfreien Bereitstellung von Diensten mittels agentenbasiertem Konzept für ASOA-Strukturen sind keine relevanten Veröffentlichungen bekannt geworden. Bzgl. Optimierungsalgorithmen gibt es zwar regelmäßig Veröffentlichungen, allerdings ist keine bekannt geworden, die eine Integration der ASIL aus der ISO 26262 beinhalten würde. Auch der in autotech.agil gewählte Schwerpunkt der zonalen Architekturen in Verbindung mit ASOA wurde in der Fachwelt noch nicht so intensiv bearbeitet, als dass nennenswert Veröffentlichungen entstanden wären.
UULM	Im Rahmen der diensteorientierten Architektur und dem Function Offloading sind außerhalb der Arbeiten im Projekt keine relevanten neue Erkenntnisse entstanden. Insbesondere die praxisnahe Herangehensweise, die innerhalb des Projekts im Fokus stand, ist anderweitig nicht untersucht worden. Andere Arbeiten fokussieren sich mehr auf theoretische Ansätze ohne eine tatsächliche praktische Auswertung. Dies macht das im Projekt entwickelte Konzept insbesondere relevant in Bezug auf eine Anwendung in tatsächlichen Fahrzeugen. Das entwickelte Konzept des regional skalierbaren Lidar-Detektors baut auf bereits veröffentlichten Ansätzen auf. Für die Integration des Kontextwissens in Form von Kamerabildern wurde auf den bekannten YOLOv8 Ansatz von ultralytics (siehe G. Jocher, A. Chaurasia, J, Qiu, "Ultralytics YOLO“, online: https://github.com/ultralytics/ultralytics/tree/v8.2.103) zurückgegriffen, da dieser eine exzellente Detektionsperformance bietet. Für die Auswertung des Konzeptes wurden drei bekannte Lidar-Detektoren verwendet, prinzipiell ist das entwickelte Konzept aber unabhängig von der verwendeten Netzwerkarchitektur. Es wurden zudem Verbesserungen im Bereich eines Multi-Sensor-Geburtenmodells veröffentlicht (siehe: J. Bondarchuk, A. Trezza and D. J. Bucci, "Efficient Implementation of Multi-sensor Adaptive Birth Samplers for Labeled Random Finite Set Tracking," 2024 27th International Conference on Information Fusion (FUSION), Venice, Italy, 2024, pp. 1-7, doi: 10.23919/FUSION59988.2024.10706456). Dieses Geburtenmodell wurde ebenfalls in die Umfeldmodellierung im Rahmen der APs 4 und 5 der UULM implementiert und um die Betrachtung des FOVs erweitert.
UniP	Es ist kein relevanter Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt.
FAU	Der Lehrstuhl für Regelungstechnik der FAU Erlangen-Nürnberg beobachtet die Entwicklungen im Bereich automatisierten Fahrens kontinuierlich und gestaltet diese aktiv mit, insbesondere in den Bereichen probabilistische Trajektorienplanung und KI-basierte Vorhersagen. Die rasante Weiterentwicklung von KI-Methoden führt zwar zu kontinuierlichen Neuerungen, mindert jedoch nicht die Relevanz der einzelnen Aspekte des Vorhabens. Im Gegenteil: Methoden-agnostische Absicherungsansätze und der funktionsspezifische Qualitätsvektor gewinnen dadurch an Bedeutung, da sie eine robuste Bewertung und Integration unterschiedlicher Verfahren ermöglichen. Somit unterstreichen die Entwicklungen den Fortschritt des Forschungsvorhabens und die langfristige Relevanz der erzielten Ergebnisse.
iMAR	Es ist kein relevanter Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt.
INCYDE	Es ist kein relevanter Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt.
TC	Während der Projektlaufzeit wurden von verschiedenen Stellen relevante Ergebnisse in Form von Open-Source-Softwaremodulen oder -Werkzeugen bekannt. Diese tragen zur Weiterentwicklung der Qualifizierungs- und Kollaborationsplattform bei, da die im Projekt oder von Externen veröffentlichten Module in das geschaffene Framework integriert werden können. Dadurch wird die Bewertungsbasis

	erweitert und eine höhere Transparenz geschaffen. Vergleichbare Ansätze zur Etablierung eines einheitlichen Bewertungsframeworks sind derzeit nicht bekannt.
DSA	Die im Rahmen des Projekts entwickelten Ansätze zur Diagnose von diensteorientierten Fahrzeugarchitekturen finden sich bislang nicht in einschlägigen Veröffentlichungen wieder. Weder in wissenschaftlicher Literatur noch in industriellen Umsetzungen konnten fahrzeugspezifische Entwicklungen identifiziert werden, die vergleichbare Konzepte adressieren. Auch in laufenden Kundenprojekten wurde kein entsprechender Stand erkennbar. Relevante Bezugspunkte ergeben sich allenfalls aus dem IT-Umfeld, insbesondere im Bereich des Service-Monitorings in Cloud-Architekturen (z. B. OpenTelemetry). Diese Konzepte weisen jedoch wesentliche Unterschiede hinsichtlich der zugrundeliegenden Annahmen zu Ressourcenverfügbarkeit, Kommunikationsbandbreite und Echtzeitfähigkeit auf. Sie können daher nur als Inspiration dienen, ohne direkt auf die Anforderungen von Fahrzeugarchitekturen übertragbar zu sein. Eine konkrete Adaption oder Integration diagnostischer Konzepte für HPC-basierte Fahrzeugarchitekturen ist dort jedoch nicht erkennbar. Ansätze zur Einbindung von Cloud-basierten Monitoringlösungen in Edge- oder Embedded-Systeme konnten im Beobachtungszeitraum nicht identifiziert werden. Im Forschungsprojekt SofDCar ergaben sich Überlappungen mit dem Forschungsprojekt autotech.agil und Ergebnisse aus dem wurden im Rahmen einer Projektstudie zwischen den Partner ausgetauscht. Das Projekt hat damit erstmalig die Diagnose von diensteorientierten Fahrzeugarchitekturen systematisch untersucht und konzeptionell erschlossen.
IPG	Es ist kein relevanter Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt.
MBC	Es ist kein relevanter Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt.
Bosch	Die Entwicklung von Reglern für das autonome Fahren ist ein intensiv beforschtes Feld, in dem sowohl akademische Einrichtungen als auch Industrieunternehmen weltweit aktiv sind. Die modellprädiktive Regelung hat sich als ein vielversprechender Ansatz etabliert und wird zunehmend eingesetzt, um die komplexen Anforderungen an die Fahrzeugführung zu erfüllen. In der Fachwelt werden kontinuierlich neue Algorithmen und Konzepte publiziert, die darauf abzielen, die Effizienz, Echtzeitfähigkeit und Robustheit von Reglern unter Unsicherheiten zu verbessern. Dies umfasst die Weiterentwicklung von Optimierungsalgorithmen, die Berücksichtigung nichtlinearer Fahrzeugmodelle und die Integration von Unsicherheitsmodellen für Sensordaten und Umgebungsprädiktionen. Wesentliche Fortschritte bei anderen Stellen konzentrieren sich auf: Integration von KI-Methoden: Zunehmend werden maschinelles Lernen und neuronale Netze eingesetzt, um dynamische Modelle zu lernen, Kostenfunktionen adaptiv anzupassen oder direkt Regelstrategien zu erlernen (Reinforcement Learning). Dies ergänzt oder ersetzt teilweise klassische modellbasierte Ansätze, insbesondere in komplexen, schlecht modellierbaren Szenarien. Umgang mit Unsicherheiten: Die robuste Regelung unter Unsicherheiten, sei es durch ungenaue Sensormessungen, Prädiktionsfehler der Umgebung oder Modellabweichungen, bleibt ein zentrales Forschungsthema. Probabilistische Ansätze, robuste MPC und stochastische MPC sind hier verbreitet. Ganzheitliche Systemintegration: Viele Ansätze fokussieren auf die nahtlose Integration der Regelung mit anderen Funktionsblöcken des autonomen Fahrens, wie Lokalisierung, Perzeption und Trajektorienplanung. Hierbei werden oft hierarchische Regelungsstrukturen verfolgt oder ko-optimierte Lösungen entwickelt, um Inkonsistenzen zwischen den Modulen zu vermeiden.

	Skalierbarkeit und Recheneffizienz: Angesichts der hohen Rechenanforderungen von MPC-Algorithmen ist die Entwicklung von effizienten Lösern und die Nutzung von Hardware-Beschleunigung (z.B. GPUs, FPGAs) ein wichtiger Trend, um die Echtzeitfähigkeit für komplexe Szenarien zu gewährleisten. Validierung und Absicherung: Da die Sicherheit im autonomen Fahren oberste Priorität hat, wird intensiv an Methoden zur Validierung und Absicherung von Reglern gearbeitet. Dies umfasst formale Verifikationsmethoden, umfangreiche Simulationen und die Entwicklung von Teststrategien für reale Fahrbedingungen.
Valeo	Dadurch, dass es sich erstmalig um die Simulation von echten analogen Sensordaten handelt, ist ein Fortschritt bei Dritten nicht sichtbar.
VI	Es ist kein relevanter Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt.
VIR-HEX	Die eingereichten Verbesserungen der Lichtsignalanlagen für digitale Zwillinge in den ASAM-Standards OpenDRIVE und OpenSCENARIO erhöhen die Qualität und Quantität zukünftiger digitaler Zwillinge im Automotive-Bereich.
VT	Es ist kein relevanter Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt.
ZF	Im Bereich der Plattformabstraktion gibt es derzeit die größte Aktivität im Rahmen der S-CORE-Initiative, sodass ein kompletter Open-Source Software-Stack entstehen soll, der es den beteiligten Unternehmen ermöglicht, möglichst schnell auf die Entwicklung in dem Softwareumfeld der Automobilindustrie zu reagieren. Hierzu werden fortlaufend Ergebnisse aus unterschiedlichen Projekten in die Eclipse-SdV Foundation eingebracht, auch von ZF. Mit den insbesondere in AP 3.4 durchgeführten Arbeiten konnte dazu beigetragen werden, die Mitarbeiter zu weiteren Beiträgen in diesem Rahmen zu befähigen. Hierzu wurden gemeinschaftliche Arbeiten mit Vector Informatik GmbH oder die Anknüpfungen an Ergebnisse aus dem Projekt SofDCar gefördert. Die während der Projektlaufzeit vorliegende Implementierung der OpenVehicleAPI wurde analysiert und hinsichtlich der Verwendung im Projekt autotech.agil bewertet. In dem damaligen Stand wurde von einer Verwendung abgesehen, in dem Folgeprojekt HAL4SDV werden die Arbeiten aus autotech.agil und SofDCar zu den OpenVehicleAPI unter dem Eclipse-Projekt „Automotive API“ konsolidiert.

6 Anhang

6.1 Öffentlichkeitsarbeit

Beiträge in der Presse

Datum	Titel	Autor(en) / Beteiligte	Veranstaltung / Herausgeber	Verlinkungen
2023-02-15	Eine offene Software- und Hardware-Architektur für zukünftige Fahrzeuge	Pressemitteilung des autotech.agil-Konsortiums	automanager.TV	-
2023-02-15	R&D project develops open E/E architecture for future vehicles	Pressemitteilung des autotech.agil-Konsortiums	eeNews Europe	https://www.eenewseurope.com/en/rd-project-develops-open-e-e-architecture-for-future-vehicles/
2023-02-16	Offene Software- und Hardware-Architektur für Fahrzeuge	Pressemitteilung des autotech.agil-Konsortiums	elektronikpraxis.de Vogel Communications Group GmbH & Co. KG	https://www.elektronikpraxis.de/offene-software-und-hardware-architektur-fuer-fahrzeuge-a-adcffea57679d8c907fba31c819d86e7/
2023-02-21	Konsortium entwickelt Software- und Hardware-Architektur für Fahrzeuge	Pressemitteilung des autotech.agil-Konsortiums	Dev-Insider Vogel IT-Medien GmbH	https://www.automobil-industrie.vogel.de/mercedes-zf-bosch-software-defined-vehicle-a-592866efa0dd2da1845e408bfbe00f27/
2023-02-26	Offene Software- und Hardware-Architektur: Konsortium arbeitet am Mobilitätssystem der Zukunft	Pressemitteilung des autotech.agil-Konsortiums	Automobilwoche Crain Communications GmbH	https://www.automobilwoche.de/bc-online/autotechagil-konsortium-arbeitet-am-mobilitatssystem-der-zukunft
2023-04-01	Eine offene Software- und Hardware-Architektur für zukünftige Fahrzeuge: Führende Universitäten und Automobilentwickler wollen intelligente und vernetzte Fahrzeuge ermöglichen	Pressemitteilung des autotech.agil-Konsortiums	Campushunter campushunter media GmbH	https://campushunter.de/dwn/ch_2023/pdf_aachen_120dpi_SS_2023.pdf

Datum	Titel	Autor(en) / Beteiligte	Veranstaltung / Herausgeber	Verlinkungen
2023-07-11	Automotive R&D consortium aims to transform German mobility: Aachen University's Autotech.agile project is developing a collaborative template for a scalable autonomous EV system	Lutz Eckstein Raphael van Kempen Kathrin Hülsen	Automotive World Automotive World Ltd	https://www.automotiveworld.com/articles/automotive-rd-consortium-aims-to-transform-german-mobility/
2023-08-10	Dem autonomen Auto soll die Zukunft gehören. Doch die wird anders, als viele denken, sagen Forscher.	Domagoj Majstorovic Frank Diermeyer	ZEIT ONLINE	https://www.zeit.de/2023/34/autonohmes-fahren-strassenverkehr-gefaehrliche-situationen?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F
2023-11-29 **2023-12-04**	Continuous integration and testing will play a fundamental role in future cooperative intelligent transportation systems	Lutz Eckstein	Automotive Testing Technology International UKi Media & Events a division of UKIP Media & Events Ltd	https://automotivetesting.mydigitalpublication.com/?i=810426&p=106 https://www.automotivetestingtechnologyinternational.com/industry-opinion/developing-a-future-cooperative-intelligent-transportation-system.html
2024-04-01	AUTOtech.agil – Entwicklung einer offenen Architektur für das Mobilitätssystem der Zukunft	Lukas Zanger Kathrin Hülsen Raphael van Kempen	Kompetenznertzwerk automatisierte und vernetzte Mobilität Innocam.NRW	https://www.innocam.nrw/autotech-agil/
2025-09-04	autotech.agil Final Event 11/09	Pressemitteilung des autotech.agil-Konsortiums	CCAM Partnership	https://www.ccam.eu/autotech-agil-final-event-11-09/
2025-09-04	autotech.agil: Forschung zeigt, wie Autos selbstständig kooperieren	Pressemitteilung des autotech.agil-Konsortiums	ingenieur.de VDI Verlag GmbH	https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/automation/autotech-agil-forschung-zeigt-wie-autos-selbststaendig-kooperieren/
2025-09-11	Mobilität der Zukunft - Autos ohne Fahrer und Bremspedal	Raphael van Kempen	RTL West	https://www.rtl.de/rtl-west/mobilitaet-der-zukunft-autos-ohne-fahrer-und-bremspedal-id6693071.html

Datum	Titel	Autor(en) / Beteiligte	Veranstaltung / Herausgeber	Verlinkungen
2025-09-11	Autonomes Fahren: Fahrende Lieferwagen ohne Fahrer	Raphael van Kempen	WDR Aachen	https://www1.wdr.de/nachrichten/rheinland/rwth-autonomes-fahren-aachen-100.html
2025-09-11	RWTH Aachen testet neue autonome Fahrzeuge	Raphael van Kempen	WDR Aktuell	https://www1.wdr.de/fernsehen/wdr-aktuell/videos/wdr-aktuell--lokalzeit-clip-wdr-aktuell--11-09-2025--1800-uhr-100.html
2025-09-12	Vorbild für Europa: Wie das autonome Fahren noch zum Erfolgsmodell werden kann	Lutz Eckstein Raphael van Kempen	VDI nachrichten	https://www.vdi-nachrichten.com/technik/mobilitaet/vorbild-fuer-europa-wie-das-autonome-fahren-noch-zum-erfolgsmodell-werden-kann/
2025-09-13	Forschung zum Anfassen: Mitfahrgelegenheit in die Zukunft der Mobilität	Pressemitteilung des autotech.agil-Konsortiums	oekonews.at	https://oekonews.at/forschung-zum-anfassen-mitfahrgelegenheit-in-die-zukunft-der-mobilitaet+2400+1229477?cd=10
2025-09-15	Autonomous, Connected, Accessible – The Future of Mobility	Pressemitteilung des autotech.agil-Konsortiums	RWTH Aachen University	https://www.rwth-aachen.de/go/id/bppbde?lidx=1#aaaaaaaaabppbex https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=yUEs6q-tf88
2025-09-18	Autonomous, Connected, Accessible – The Future of Mobility	Pressemitteilung des autotech.agil-Konsortiums	avamerica.org	http://www.avamerica.org/autonomous-connected-accessible-the-future-of-mobility/

Projektpräsentation bei Veranstaltungen

Datum	Ort	Veranstaltung	Beteiligte	Verlinkungen
2023-05-23	Dresden	16. Tagung Diagnose in mechatronischen Fahrzeugsystemen	DSA	https://www.diagnose-tagung.de/aktuell/

Datum	Ort	Veranstaltung	Beteiligte	Verlinkungen
2023-02-15	Porto Heli, Griechenland	1st Hi-Drive Summer School	TUBS-IFR TUDA-FZD	https://www.hi-drive.eu/events/summerschool_1/
2023-10-09	Aachen	32. Aachen Colloquium Sustainable Mobility	RWTH-IKA ZF	https://www.aachener-kolloquium.de/de/
2023-10-18	Bonn	VDI-Kongress Eliv – Electronics in Vehicles	RWTH-IKA RWTH-i11	https://www.vdi-wissensforum.de/eliv/
2023-11-18	Nürtingen	VDI Umfelderfassung im Fahrzeug 2023	TUM-AIR	https://www.vdi-wissensforum.de/weiterbildung-automobil/fahrzeugumfelderfassung/
2024-04-15	Dublin, Irland	TRA Transport Research Arena, 10th Conference	Valeo	https://traconference.eu/
2024-10-14	Shanghai, China	SAE, Intelligent Connected Vehicle Evaluation 2024	DSA	https://saemobilus.sae.org/papers/diagnostics-automotive-service-oriented-architectures-with-sovd-2024-01-7036
2024-10-16	Bonn	VDI-Kongress Eliv – Electronics in Vehicles autotech.agil Halbzeitveranstaltung	Das autotech.agil-Projektkonsortium	https://www.vdi-wissensforum.de/eliv/
2024-12-05	München	ASAM International Conference 2024	DSA	https://www.asam.net/conferences-events/detail/asam-international-conference-2024/
2025-09-11	Aldenhoven	autotech.agil Abschlussveranstaltung	Das autotech.agil-Projektkonsortium	https://www.autotechagil.de/abschlussveranstaltung/

Wissenschaftliche Veröffentlichungen (Konferenz- und Journalbeiträge)

Alle wissenschaftlichen Veröffentlichungen im Rahmen des Projekts autotech.agil sind unter https://zenodo.org/communities/autotechagil abrufbar. Der Stand zum Projektende am 30.09.2025 ist außerdem in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Datum	Titel	Autor(en)	Veranstaltung / Herausgeber	Verlinkungen
2022-10-01	Industry-track: System-Level Logical Execution Time for Automotive Software Development	Gemlau, Kai-Björn (Technische Universität Braunschweig); von Hasseln, Hermann (Mercedes-Benz (Germany)); Ernst, Rolf (Technische Universität Braunschweig); et al.	International Conference on Embedded Software, Shanghai, China, 07-14 October 2022	10.1109/EMSOFT55006.2022.00017 Zenodo
2023-02-24	Mobilität - Quo vadis?	Eckstein, Lutz (RWTH Aachen University)	ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, vol. 125, pp. 66	10.1007/s35148-023-1564-x Zenodo
2023-05-09	Digital Twin Approach for Accurate System-Level Simulation of Wide-Bandgap Power-Semiconductors using Temperature Dependent Parameters	Solomakha, Oleksandr (University of Stuttgart); Munoz Baron, Kevin (University of Stuttgart); Kallfass, Ingmar (University of Stuttgart); et al.	International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM), Nürnberg, Germany, 09-11 May 2023	10.30420/566091279 Zenodo
2023-06-04	Targetless Extrinsic Calibration Between Event-Based and RGB Camera for Intelligent Transportation Systems	Creß, Christian (Technical University of Munich); Schütz, Erik (Technical University of Munich); Žagar, Bare Luka (Technical University of Munich); et al.	2023 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Anchorage, AK, USA, 04-07 June 2023	10.1109/IV55152.2023.10186538 Zenodo
2023-06-04	InfraDet3D: Multi-Modal 3D Object Detection based on Roadside Infrastructure Camera and LiDAR Sensors	Zimmer, Walter (Technical University of Munich); Birkner, Joseph (Technical University of Munich); Brucker, Marcel (Technical University of Munich); et al.	2023 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Anchorage, AK, USA, 04-07 June 2023	10.1109/IV55152.2023.10186723 Zenodo

Datum	Titel	Autor(en)	Veranstaltung / Herausgeber	Verlinkungen
2023-07-06	Online Junction Temperature Estimation of Power Semiconductor Devices using Neural Network and Model-Based Design	Solomakha, Oleksandr (University of Stuttgart); Afanasenko, Valentyna (University of Stuttgart); Kallfass, Ingmar (University of Stuttgart); et al.	IEEE EUROCON 2023 - 20th International Conference on Smart Technologies, Torino, Italy, 06-08 July 2023	10.1109/EUROCON56442.2023.10198878 Zenodo
2023-09-24	Advancing Frame-Dropping in Multi-Object Tracking-by-Detection Systems Through Event-Based Detection Triggering	Henning, Matti (Universität Ulm); Buchholz, Michael (Universität Ulm); Dietmayer, Klaus (Universität Ulm); et al.	2023 IEEE 26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Bilbao, Spain, 24-28 September 2023	10.1109/ITSC57777.2023.10422570 Zenodo
2023-09-24	RobotKube: Orchestrating Large-Scale Cooperative Multi-Robot Systems with Kubernetes and ROS	Lampe, Bastian (RWTH Aachen University); Reiher, Lennart (RWTH Aachen University); Zanger, Lukas (RWTH Aachen University); et al.	2023 IEEE 26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Bilbao, Spain, 24-28 September 2023	10.1109/ITSC57777.2023.10422370 Zenodo
2023-09-24	TUMTraf Intersection Dataset: All You Need for Urban 3D Camera-LiDAR Roadside Perception	Zimmer, Walter (Technical University of Munich); Creß, Christian (Technical University of Munich); Nguyen, Huu Tung (Technical University of Munich); et al.	2023 IEEE 26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Bilbao, Spain, 24-28 September 2023	10.1109/ITSC57777.2023.10422289 Zenodo
2023-09-24	On Assumptions with Respect to Occlusions in Urban Environments for Automated Vehicle Speed Decisions	Graubohm, Robert (Technische Universität Braunschweig); Salem, Nayel Fabian (Technische Universität Braunschweig); Nolte, Marcus (Technische Universität Braunschweig); et al.	2023 IEEE 26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Bilbao, Spain, 24-28 September 2023	10.1109/ITSC57777.2023.10422457 Zenodo

Datum	Titel	Autor(en)	Veranstaltung / Herausgeber	Verlinkungen
2023-10-01	Challenges of Integrating Model-Based Digital Twins for Vehicle Diagnosis	Heithoff, Malte (RWTH Aachen University); Konersmann, Marco (RWTH Aachen University); Michael, Judith (RWTH Aachen University); et al.	2023 ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems Companion (MODELS-C), Västerås, Sweden, 01-06 October 2023	10.1109/MODELS-C59198.2023.00082 Zenodo
2023-10-01	Challenges of Integrating Model-Based Digital Twins for Vehicle Diagnosis	Malte Heithoff, Marco Konersmann, Judith Michael, Bernhard Rumpe, Felix Steinfurth	2023 ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems Companion (MODELS-C)	10.1109/MODELS-C59198.2023.00082 SE-RWTH
2023-10-02	Multi-Task Consistency for Active Learning	Hekimoglu, Aral (Technical University of Munich); Friedrich, Philipp (BMW Group (Germany)); Zimmer, Walter (Technical University of Munich); et al.	2023 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW), Paris, France, 02-06 October 2023	10.1109/ICCVW60793.2023.00366 Zenodo
2023-10-09	AUTOtech.agil : Architecture and Technologies for Orchestrating Automotive Agility	van Kempen, Raphael (RWTH Aachen University); Lampe, Bastian (RWTH Aachen University); Leuffen, Marc (RWTH Aachen University); et al.	32. Aachen Colloquium Sustainable Mobility, Aachen, Germany, 9-11 October 2023	10.18154/RWTH-2023-09783 Zenodo
2023-10-16	Dynamic Collaborative Path Planning for Remote Assistance of Highly-Automated Vehicles	Majstorović, Domagoj (Technical University of Munich); Diermeyer, Frank (Technical University of Munich)	2023 IEEE International Automated Vehicle Validation Conference (IAVVC), Austin, TX, USA, 16-18 October 2023	10.1109/IAVVC57316.2023.10328097 Zenodo
2023-10-16	Ensuring Trustworthy Automated Road Vehicles: A Software Integrity Validation Approach	Püllen, Dominik (University of Passau); Klement, Felix (University of Passau); Vinel, Alexey (Karlsruhe Institute of Technology); et al.	2023 IEEE International Automated Vehicle Validation Conference (IAVVC), Austin, TX, USA, 16-18 October 2023	10.1109/IAVVC57316.2023.10328103 Zenodo

Datum	Titel	Autor(en)	Veranstaltung / Herausgeber	Verlinkungen
2023-10-24	Systematic Derivation of Use Case Clusters for a Generalized Low-Speed Automated Driving Function	Berghöfer, Moritz (Technical University of Darmstadt); Lutwitzi, Melina (Technical University of Darmstadt); Peters, Steven (Technical University of Darmstadt); et al.	15. Workshop Fahrerassistenz und automatisiertes Fahren (FAS), Berkheim, Germany, 24-26 October 2023	10.5281/zenodo.13255630 Zenodo
2023-10-24	Random-Finite-Set-basiertes Multisensor-Multiobjekttracking für automatisierte und vernetzte Fahrzeuge: Aktueller Forschungsstand und offene Fragen	Herrmann, Martin (Universität Ulm); Hermann, Charlotte (Universität Ulm); Dietmayer, Klaus (Universität Ulm); et al.	15. Workshop Fahrerassistenz und automatisiertes Fahren (FAS), Berkheim, Germany, 24-26 October 2023	10.18725/OPARU-51245 Zenodo
2023-11-16	Sim-to-Real Domain Adaptation of Infrastructure Sensor Lidar Point Clouds using Generative Adversarial Networks	Klöker, Amarin (RWTH Aachen University); Liu, Yangyi (RWTH Aachen University); Maier, Mischa (RWTH Aachen University); et al.	2023 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET), Cape Town, South Africa, 16-17 November 2023	10.1109/ICECET58911.2023.10389244 Zenodo
2023-11-16	Scalable Real-Time Multi Object Tracking for Automated Driving Using Intelligent Infrastructure	Thomsen, Fabian (RWTH Aachen University); Ortmann, Maximilian (RWTH Aachen University); Eckstein, Lutz (RWTH Aachen University); et al.	2023 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET), Cape Town, South Africa, 16-17 November 2023	10.1109/ICECET58911.2023.10389193 Zenodo
2023-11-16	Enhancing Lidar-Based Object Detection in Adverse Weather Using Offset Sequences in Time	van Kempen, Raphael (RWTH Aachen University); Rehbronn, Tim (RWTH Aachen University); Jose, Abin (RWTH Aachen University); et al.	2023 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET), Cape Town, South Africa, 16-17 November 2023	10.1109/ICECET58911.2023.10389489 Zenodo
2023-11-27	Track Classification for Random Finite Set Based Multi-Sensor Multi-Object Tracking	Scheible, Alexander (Universität Ulm); Griebel, Thomas (Universität Ulm); Herrmann, Martin (Universität Ulm); et al.	2023 IEEE Symposium Sensor Data Fusion and International Conference on Multisensor Fusion and Integration (SDF-MFI), Bonn, Germany, 27-29 November 2023	10.1109/SDF-MFI59545.2023.10361438 Zenodo

Datum	Titel	Autor(en)	Veranstaltung / Herausgeber	Verlinkungen
2023-12-28	Intelligent Transportation Systems Using Roadside Infrastructure: A Literature Survey	Creß, Christian (Technical University of Munich); Bing, Zhenshan (Technical University of Munich); Knoll, Alois (Technical University of Munich); et al.	IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 25, issue 7, pp. 6309-6327	10.1109/TITS.2023.3343434 Zenodo
2024-01-19	Robust Meta-Learning of Vehicle Yaw Rate Dynamics via Conditional Neural Processes	Lars, Ullrich (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg); Völz, Andreas (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg); Graichen, Knut (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg); et al.	2023 62nd IEEE Conference on Decision and Control (CDC) (CDC), Singapore, Singapore, 13-15 December 2023	10.1109/CDC49753.2023.10384159 Zenodo
2024-04-25	TUMTraf Event: Calibration and Fusion Resulting in a Dataset for Roadside Event-Based and RGB Cameras	Christian, Creß (Technical University of Munich); Zimmer, Walter (Technical University of Munich (TUM)); Purschke, Nils (Technical University of Munich (TUM)); et al.	IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, vol. 9, issue 7, pp. 1--19	10.1109/TIV.2024.3393749 Zenodo
2024-05-02	PointCompress3D: A Point Cloud Compression Framework for Roadside LiDARs in Intelligent Transportation Systems	Zimmer, Walter (Technical University of Munich); Pranamulia, Ramandika (Technical University of Munich); Zhou, Xingcheng (Technical University of Munich); et al.	IEEE ITSC 2025 The IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) November 18 – 21, 2025 – Gold Coast, Australia	10.48550/arXiv.2405.01750 Zenodo
2024-05-13	Enabling the Deployment of Any-Scale Robotic Applications in Microservice Architectures through Automated Containerization	Busch, Jean-Pierre (RWTH Aachen University); Reiher, Lennart (RWTH Aachen University); Eckstein, Lutz (RWTH Aachen University); et al.	2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Yokohama, Japan, 13-17 May 2024	10.1109/ICRA57147.2024.10611586 Zenodo

Datum	Titel	Autor(en)	Veranstaltung / Herausgeber	Verlinkungen
2024-05-16	Vision Language Models in Autonomous Driving: A Survey and Outlook	Zhou, Xingcheng (Technicall University of Munich (TUM)); Liu, Mingyu (Technical University of Munich (TUM)); Yurtsever, Ekim (The Ohio State University); et al.	IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, vol. 9, issue 7, pp. 1--20	10.1109/TIV.2024.3402136 Zenodo
2024-05-17	Online Degradation Detection and Estimation of SiC Power MOSFET based on TSEP	Afanasenko, Valentyna (University of Stuttgart); Solomakha, Oleksandr (University of Stuttgart); Kallfass, Ingmar (University of Stuttgart); et al.	2024 IEEE 10th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2024-ECCE Asia), Chengdu, China, 17-20 May 2024	10.1109/IPEMC-ECCEAsia60879.2024.10567870 Zenodo
2024-06-02	ActiveAnno3D - An Active Learning Framework for Multi-Modal 3D Object Detection	Ghita, Ahmed (Technical University of Munich); Antoniussen, Bjørk (Aalborg University); Zimmer, Walter (Technical University of Munich); et al.	2024 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Jeju Island, Korea, 02-05 June 2024	10.1109/IV55156.2024.10588452 Zenodo
2024-06-02	A Graph Neural Network Approach for Solving the Ranked Assignment Problem in Multi-Object Tracking	Dehler, Robin (Universität Ulm); Herrmann, Martin (Universität Ulm); Strohbeck, Jan (Universität Ulm); et al.	2024 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Jeju Island, Korea, 02-05 June 2024	10.1109/IV55156.2024.10588674 Zenodo
2024-06-02	CARLOS: An Open, Modular, and Scalable Simulation Framework for the Development and Testing of Software for C-ITS	Geller, Christian (RWTH Aachen University); Haas, Benedikt (RWTH Aachen University); Klöker, Amarin (RWTH Aachen University); et al.	2024 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Jeju Island, Korea, 02-05 June 2024	10.1109/IV55156.2024.10588502 Zenodo
2024-06-02	Trajectory Guidance: Enhanced Remote Driving of highly-automated Vehicles	Majstorovic, Domagoj (Technical University of Munich); Hoffmann, Simon (Technical University of Munich); Diermeyer, Frank (Technical University of Munich); et al.	2024 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Jeju Island, Korea, 02-05 June 2024	10.1109/IV55156.2024.10588536 Zenodo

Datum	Titel	Autor(en)	Veranstaltung / Herausgeber	Verlinkungen
2024-06-02	MAP-Former: Multi-Agent-Pair Gaussian Joint Prediction	Steiner, Marlon (Karlsruhe Institute of Technology); Klemp, Marvin (Karlsruhe Institute of Technology); Stiller, Christoph (Karlsruhe Institute of Technology); et al.	2024 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Jeju Island, Korea, 02-05 June 2024	10.1109/IV55156.2024.10588702 Zenodo
2024-06-11	Trajectory Planning for Efficient BVLOS Drone Flights over Agricultural Points of Interest	Hartmann, Max (RWTH Aachen University); Voget, Nicolai (RWTH Aachen University); Seitz, Sebastian (RWTH Aachen University); et al.	2024 CEAS EuroGNC conference (CEAS-GNC), Bristol, UK, 11-13 June 2024	10.5281/zenodo.13322610 Zenodo
2024-06-25	The Automotive Software Marketplace	Woopen, Timo (TC)	37. VDI-Tagung Fahrerassistenzsysteme und Automatisiertes Fahren	https://www.vdi-wissensforum.de/weiterbildung-automobil/vdivw-tagung-fahrerassistenzsysteme/
2024-06-28	RoadSense3D: A Framework for Roadside Monocular 3D Object Detection	Carta, Salvatore (University of Cagliari); Castrillón-Santana, Modesto (Universidad de Las Palmas de Gran Canaria); Marras, Mirko (University of Cagliari); et al.	32nd ACM Conference on User Modeling, Adaptation and Personalization (UMAP), Cagliari, Italy, 07-04 July 2024	10.1145/3631700.3665236 Zenodo
2024-06-30	Towards a Data-Based Interface Definition to Support a Modular Safety Approval of Highly Automated Vehicles	Blödel, Alexander (Technical University of Darmstadt); Klamann, Björn (Technical University of Darmstadt); Peters, Steven (Technical University of Darmstadt); et al.	2024 Stuttgart International Symposium on Automotive and Engine Technology (ISSYM), Stuttgart, Germany, 2-3 July 2024	10.1007/978-3-658-45018-2_5 Zenodo
2024-07-01	Secure Data-Binding in FPGA-based Hardware Architectures utilizing PUFs	Frank, Florian (University of Passau); Schmid, Martin (University of Passau); Klement, Felix (University of Passau); et al.	19th ACM Asia Conference on Computer and Communications Security (ASIA CCS), Singapore, Singapore, 1-5 July, 2024	10.1145/3634737.3656996 Zenodo

Datum	Titel	Autor(en)	Veranstaltung / Herausgeber	Verlinkungen
2024-07-15	Transfer Learning Study of Motion Transformer-based Trajectory Predictions	Lars, Ullrich (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg); McMaster, Alex (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg); Graichen, Knut (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg); et al.	2024 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) (IV), Jeju Island, Korea, Republic of, 02-05 June 2024	10.1109/IV55156.2024.10588422 Zenodo
2024-07-15	Sampling for Model Predictive Trajectory Planning in Autonomous Driving using Normalizing Flows	Rabenstein, Georg (None); Ullrich, Lars (None); Graichen, Knut (None); et al.	2024 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) (IV), Jeju Island, Korea, Republic of, 02-05 June 2024	10.1109/IV55156.2024.10588765 Zenodo
2024-07-24	Adaptive Human-Machine Interfaces and Inclusivity in the Automotive Field: A Review	Wirtz, Lena (RWTH Aachen University); Sever, Emirhan (RWTH Aachen University); Eckstein, Lutz (RWTH Aachen University); et al.	Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE), Nice, France, 24-27 July 2024	10.54941/ahfe1004613 Zenodo
2024-07-29	Expanding the Classical V-Model for the Development of Complex Systems Incorporating AI	Ullrich, Lars (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg); Buchholz, Michael (Universität Ulm); Dietmayer, Klaus (Universität Ulm); et al.	IEEE Transactions on Intelligent Vehicles	10.1109/TIV.2024.3434515 Zenodo
2024-07-30	Overview on open source projects developed in the autotech.agil project	RWTH Aachen University (None)		10.5281/zenodo.13254118 Zenodo
2024-08-07	Combined Registration and Fusion of Evidential Occupancy Grid Maps for Live Digital Twins of Traffic	van Kempen, Raphael (RWTH Aachen University); Heidrich, Laurenz Adrian (RWTH Aachen University); Lampe, Bastian (RWTH Aachen University); et al.	2023 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Anchorage, Alaska, USA, 04-07 June 2023	10.1109/IV55152.2023.10186600 Zenodo

Datum	Titel	Autor(en)	Veranstaltung / Herausgeber	Verlinkungen
2024-09-06	An Efficient Implementation of the Fast Product Multi-Sensor Labeled Multi-Bernoulli Filter	Hermann, Charlotte; Scheible, Alexander; Buchholz, Michael; Dietmayer, Klaus (alle UULM-MRM)	2024 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), Pilsen, Czech Republic, 04-06 September 2024	https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/10705756/proceeding
2024-09-16	TUMTraf V2X Cooperative Perception Dataset	Zimmer, Walter (Technical University of Munich); Wardana, Gerhard Arya (Technical University of Munich); Sritharan, Suren (Technical University of Munich); et al.	2024 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Seattle, WA, USA, 16-22 June 2024	10.1109/CVPR52733.2024.02139 Zenodo
2024-09-22	Customized HMI as a Key to increased Acceptance? Implications of an Online Survey assessing Relationships of Experience, Trust and Information Interest	Wirtz, Lena (RWTH Aachen University); Feger, Ida (RWTH Aachen University); Wagner-Douglas, Lotte (RWTH Aachen University); et al.	AutomotiveUI '24 Adjunct: Adjunct Proceedings of the 16th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, Stanford, USA, 22-25 September, 2024	10.1145/3641308.3685034 Zenodo
2024-09-24	V2AIX: A Multi-Modal Real-World Dataset of ETSI ITS V2X Messages in Public Road Traffic	Kueppers, Guido (RWTH Aachen University); Busch, Jean-Pierre (RWTH Aachen University); Reiher, Lennart (RWTH Aachen University); et al.	2024 IEEE 27th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Edmonton, AB, Canada, 24-27 September 2024	10.1109/ITSC58415.2024.10920150 Zenodo
2024-09-24	The ADUULM-360 Dataset - A Multi-Modal Dataset for Depth Estimation in Adverse Weather	Schön, Markus (Universität Ulm); Ruof, Jona (Universität Ulm); Wodtko, Thomas (Universität Ulm); et al.	2024 IEEE 27th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Edmonton, AB, Canada, 24-27 September 2024	10.1109/ITSC58415.2024.10920201 Zenodo

Datum	Titel	Autor(en)	Veranstaltung / Herausgeber	Verlinkungen
2024-09-24	SceneMotion: From Agent-Centric Embeddings to Scene-Wide Forecasts	Wagner, Royden (Karlsruhe Institute of Technology); Taş, Ömer Şahin (Karlsruhe Institute of Technology); Steiner, Marlon (Karlsruhe Institute of Technology); et al.	2024 IEEE 27th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Edmonton, AB, Canada, 24-27 September 2024	10.1109/ITSC58415.2024.10919533 Zenodo
2024-09-24	GraphRelate3D: Context-Dependent 3D Object Detection with Inter-Object Relationship Graphs	Liu, Mingyu (Technical University of Munich); Yurtsever, Ekim (Ohio State University); Brede, Marc (Technical University of Munich); et al.	2024 IEEE 27th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Edmonton, AB, Canada, 24-27 September 2024	10.1109/ITSC58415.2024.10919972 Zenodo
2024-09-24	WARM-3D: A Weakly-Supervised Sim2Real Domain Adaptation Framework for Roadside Monocular 3D Object Detection	Zhou, Xingcheng (Technical University of Munich); Fu, Deyu (Technical University of Munich); Zimmer, Walter (Technical University of Munich); et al.	2024 IEEE 27th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Edmonton, AB, Canada, 24-27 September 2024	10.1109/ITSC58415.2024.10919929 Zenodo
2024-09-24	A Concept for Semi-Automatic Configuration of Sufficiently Valid Simulation Setups for Automated Driving Systems	Braun, Niklas (Technische Universität Braunschweig); Steimle, Markus (Technische Universität Braunschweig); Torngren, Martin (KTH Royal Institute of Technology); et al.	2024 IEEE 27th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Edmonton, AB, Canada, 24-27 September 2024	10.1109/ITSC58415.2024.10919986 Zenodo
2024-09-24	Showcasing Automated Vehicle Prototypes: A Collaborative Release Process to Manage and Communicate Risk	Loba, Marvin (Technische Universität Braunschweig); Graubohm, Robert (Technische Universität Braunschweig); Maurer, Markus (Technische Universität Braunschweig); et al.	2024 IEEE 27th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Edmonton, AB, Canada, 24-27 September 2024	10.1109/ITSC58415.2024.10919548 Zenodo

Datum	Titel	Autor(en)	Veranstaltung / Herausgeber	Verlinkungen
2024-09-24	Conformal Prediction of Motion Control Performance for an Automated Vehicle in Presence of Actuator Degradations and Failures	Schubert, Richard (Technische Universität Braunschweig); Loba, Marvin (Technische Universität Braunschweig); Sünnemann, Jasper (Technische Universität Braunschweig); et al.	2024 IEEE 27th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Edmonton, AB, Canada, 24-27 September 2024	10.1109/ITSC58415.2024.10920241 Zenodo
2024-09-24	A Prototypical Expert-Driven Approach Towards Capability-Based Monitoring of Automated Driving Systems	Schubert, Richard (Technische Universität Braunschweig); Kaufmann, Cedrik (Technische Universität Braunschweig); Nolte, Marcus (Technische Universität Braunschweig); et al.	2024 IEEE 27th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Edmonton, AB, Canada, 24-27 September 2024	10.1109/ITSC58415.2024.10919913 Zenodo
2024-09-29	Transfer Learning from Simulated to Real Scenes for Monocular 3D Object Detection	Mohamed, Sondos (University of Cagliari); Zimmer, Walter (Technical University of Munich); Greer, Ross (University of California, Merced); et al.	Computer Vision – ECCV 2024 Workshops (ECCV), Milan, Italy, September 29-October 4, 2024	10.1007/978-3-031-91813-1_20 Zenodo
2024-10-06	Risk-Aware Shared Control for Teleoperation of Automated Vehicles in Dynamic Environments	Brecht, David (Technical University of Munich); Diermeyer, Frank (Technical University of Munich)	2024 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), Kuching, Malaysia, 06-10 October 2024	10.1109/SMC54092.2024.10831424 Zenodo
2024-10-07	Real-Time Risk Assessment of Security Incidents for Autonomous Vehicles	Yaman Qendah, Dominik Püllen, Stefan Katzenbeisser	2024 IEEE 100th Vehicular Technology Conference	https://doi.org/10.1109/VTC2024-Fall63153.2024.10757969
2024-10-09	The Fast Product Multi-Sensor Labeled Multi-Bernoulli Filter	Hermann, Charlotte (Universität Ulm); Scheible, Alexander (Universität Ulm); Buchholz, Michael (Universität Ulm); et al.	2024 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), Pilsen, Czech Republic, 04-06 September 2024	10.1109/MFI62651.2024.10705774 Zenodo
2024-10-14	Explainable AI for Safe and Trustworthy Autonomous Driving: A Systematic Review	Kuznietsov, Anton (Technical University of Darmstadt); Gyevnar, Balint (University of Edinburgh);	IEEE TRansactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 25, pp. 19342-19364	https://doi.org/10.1109/TITS.2024.3474469 Zenodo

Datum	Titel	Autor(en)	Veranstaltung / Herausgeber	Verlinkungen
		Wang, Cheng (University of Edinburgh); Peters, Steven (Technical University of Darmstadt); Albrecht, Stefano V. (University of Edinburgh)		
2024-10-14	Explainable AI for Safe and Trustworthy Autonomous Driving: A Systematic Review	Kuznietsov, Anton (Technical University of Darmstadt); Gyevnar, Balint (University of Edinburgh); Wang, Cheng (Heriot-Watt University); et al.	IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 25, issue 12, pp. 19342-19364	10.1109/TITS.2024.3474469 Zenodo
2024-10-30	Introducing autoCARGO – A Fully Autonomous Robot-Assisted Vehicle for Last-Mile Parcel Delivery	Arndt, Gideon (Karlsruhe Institute of Technology); Le Large, Nick (Karlsruhe Institute of Technology); Markert, Kai (Karlsruhe Institute of Technology); et al.	Logistics Journal, vol. 2024, issue 20	10.2195/lj_proc_arndt_en_202410_01 Zenodo
2024-11-13	Architecting Autonomy: Leveraging Open Source for Next-Gen Mobility Solutions	Woopen, Timo (TC)	Mobility Innovation Week Japan 2024	tbd
2024-11-15	AI Safety Assurance for Automated Vehicles: A Survey on Research, Standardization, Regulation,	Ullrich, Lars (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg); Buchholz, Michael (Institute of Measurement, Control, and Microtechnology, Ulm University, Ulm, 89081, Germany); Dietmayer, Klaus (Institute of Measurement, Control, and Microtechnology, Ulm University, Ulm, 89081, Germany); et al.	IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, vol. (Early Access), pp. 1-19	10.1109/TIV.2024.3496797 Zenodo

Datum	Titel	Autor(en)	Veranstaltung / Herausgeber	Verlinkungen
2024-11-20	Assessment of Automotive Attack Feasibility Methods in Comparison to Railway and Aviation Methods	von Richthofen, Johannes (INCYDE GmbH, Berlin, Germany); Krauß, Christoph (Darmstadt University of Applied Sciences); Altgenug, Johann (Universität der Bundeswehr München); et al.	International Conference on Information Security and Cryptology (ICISC), Seoul, South Korea, 20-22 November, 2024	10.1007/978-981-96-5566-3_15 Zenodo
2024-12-02	Multilevel Digital Twin of Power Electronics based on Degradable Wide-Bandgap Semiconductors for State-of-Health Estimation	Solomakha, Oleksandr (University of Stuttgart); Afanasenko, Valentyna (University of Stuttgart); Kallfass, Ingmar (University of Stuttgart); et al.	2024 IEEE 9th Southern Power Electronics Conference (SPEC), Brisbane, Australia, 02-05 December 2024	10.1109/SPEC62217.2024.10893280 Zenodo
2024-12-07	MGNiceNet: Unified Monocular Geometric Scene Understanding	Schön, Markus (Universität Ulm); Buchholz, Michael (Universität Ulm); Dietmayer, Klaus (Universität Ulm); et al.	17th Asian Conference on Computer Vision (ACCV), Hanoi, Vietnam, 8-12 December, 2024	10.1007/978-981-96-0966-6_20 Zenodo
2024-12-13	Diagnostics of Automotive Service-Oriented Architectures with SOVD	Böhlen, Boris (DSA Daten- und Systemtechnik GmbH); Fischer, Diana (DSA Daten- und Systemtechnik GmbH); Wang, Jue (DSA Electronic Technology Co. Ltd.); et al.	SAE 2024 Intelligent and Connected Vehicles Symposium, Shanghai, China, 18-19 October, 2024	10.4271/2024-01-7036 Zenodo
2024-12-30	Mission Profile-Based Online Remaining Useful Life Estimation of Power MOSFETs for Electric Vehicles using CARLA	Roge, Swapnil Sunil (University of Stuttgart); Hermann, Chris Manuel (University of Stuttgart); Solomakha, Oleksandr (University of Stuttgart); et al.	2024 IEEE Design Methodologies Conference (DMC), Grenoble, France, 18-20 November 2024	10.1109/DMC62632.2024.10812122 Zenodo
2024-12-30	Multidimensional Characterization of Temperature Sensitive Electrical Parameters in SiC Mosfets using Automation of Measurement Data Analysis	Solomakha, Oleksandr (University of Stuttgart); Muñoz Barón, Kevin (University of Stuttgart); Afanasenko, Valentyna (University of Stuttgart); et al.	2024 IEEE Design Methodologies Conference (DMC), Grenoble, France, 18-20 November 2024	10.1109/DMC62632.2024.10812155 Zenodo

Datum	Titel	Autor(en)	Veranstaltung / Herausgeber	Verlinkungen
2025-02-04	TUMTraffic-VideoQA: A Benchmark for Unified Spatio-Temporal Video Understanding in Traffic Scenes	Zhou, Xingcheng (Technical University of Munich); Zimmer, Walter (Technical University of Munich);	42nd International Conference on Machine Learning (ICML 2025)	10.48550/arXiv.2502.02449 Zenodo
2025-02-24	An autonomous shuttle for everyone: What information do users need when using shuttles?	Kuck, Ida (RWTH Aachen University); Wagner-Douglas, Lotte (RWTH Aachen University); Wirtz, Lena (RWTH Aachen University); et al.	Intelligent Human Systems Integration (IHSI), Rome, Italy, 24-26 Februrary 2025	10.54941/ahfe1005861 Zenodo
2025-03-15	Towards Vision Zero: The TUM Traffic Accid3nD Dataset	Zimmer, Walter (Technical University of Munich); Greer, Ross (University of California, Merced); Zhou, Xingcheng (Technical University of Munich); et al.	IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW), Honolulu, Hawaii, 19-23 October 2025	10.48550/arXiv.2503.12095 Zenodo
2025-03-28	A Generic Service-Oriented Function Offloading Framework For Connected Automated Vehicles	Dehler, Robin; Buchholz, Michael (UULM-MRM)	IEEE Robotics and Automation Letters (May 025)	10.1109/LRA.2025.3555939
2025-03-31	Towards Efficient LiDAR-Based Perception in Autonomous Driving: Exploiting Point Cloud Sub-sampling and Camera-based Prior Knowledge	Schön, Markus; Kösel, Michael; Dietmayer, Klaus and Buchholz, Michael (alle UULM-MRM)	16. Uni-DAS e.V. Workshop Fahrerassistenz und automatisiertes Fahren (FAS), Kloster Irsee, Germany, 31 March-02 April, 2025	https://www.uni-das.de/images/pdf/fas-workshop/2025/FAS2025-02-Schoen.pdf
2025-03-31	Event Detection in C-ITS: Classification, Use Cases, and Reference Implementation	Reoher, Lennart (RWTH Aachen University); Lampe, Bastian (RWTH Aachen University); Zanger, Lukas (RWTH Aachen University); et al.	16. Uni-DAS e.V. Workshop Fahrerassistenz und automatisiertes Fahren (FAS), Kloster Irsee, Germany, 31 March-02 April, 2025	10.5281/zenodo.17141343 Zenodo

Datum	Titel	Autor(en)	Veranstaltung / Herausgeber	Verlinkungen
2025-03-31	Enhancing Highway Safety: Accident Detection on the A9 Test Stretch Using Roadside Sensors	Zimmer, Walter (Technical University of Munich); Ross, Greer (University of California, San Diego); Zhou, Xingcheng (Technical University of Munich); et al.	16. Uni-DAS e.V. Workshop Fahrerassistenz und automatisiertes Fahren (FAS), Kloster Irsee, Germany, 31 March-02 April, 2025	10.48550/arXiv.2502.00402 Zenodo
2025-03-31	Potentials of Neuromorphic Computing for Automated Driving and Future Transportation Systems	Bayerlein, Lorenz (Technical University of Darmstadt); Schulte, Jonas V. (Technical University of Darmstadt); Peters, Steven (Technical University of Darmstadt); et al.	16. Uni-DAS e.V. Workshop Fahrerassistenz und automatisiertes Fahren (FAS), Kloster Irsee, Germany, 31 March-02 April, 2025	10.5281/zenodo.17141242 Zenodo
2025-03-31	Adversarial Defense Teacher for Cross-Domain Object Detection under Poor Visibility Conditions	Wang, Kaiwen (Karlsruhe Institute of Technology); Shen, Yinzhe (Karlsruhe Institute of Technology); Lauer, Martin (Karlsruhe Institute of Technology); et al.	16. Uni-DAS e.V. Workshop Fahrerassistenz und automatisiertes Fahren (FAS), Kloster Irsee, 31 March-02 April 2025	10.48550/arXiv.2403.15786 Zenodo
2025-04-25	Enhancing System Self-Awareness and Trust of AI: A Case Study in Trajectory Prediction and Planning	Ullrich, Lars (Friedrich-Alexander-University Erlangen-Nürnberg); Mujirishvili, Zurab (Friedrich-Alexander-University Erlangen-Nürnberg); Graichen, Knut (Friedrich-Alexander-University Erlangen-Nürnberg); et al.	2025 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Cluj-Napoca, Romania	10.5281/zenodo.15283372 Zenodo
2025-05-19	Guardian Angel: A mobile application for active VRU safety enabled by a digital traffic twin	Thomsen, Fabian (RWTH Aachen University); Pfeiffer, Yanik (RWTH Aachen University); Eckstein, Lutz (RWTH Aachen University); et al.	16th ITS European Congress, Sevilla, Spain, 19-21 May 2025	10.5281/zenodo.17143161 Zenodo

Datum	Titel	Autor(en)	Veranstaltung / Herausgeber	Verlinkungen
2025-06-22	Adversarial Attacked Teacher for Domain Adaptive Object Detection Under Poor Visibility Conditions	Wang, Kaiwen (Karlsruhe Institute of Technology); Shen, Yinzhe (Karlsruhe Institute of Technology); Lauer, Martin (Karlsruhe Institute of Technology); et al.	2025 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Cluj-Napoca, Romania, 22-25 June 2025	10.1109/IV64158.2025.11097815 Zenodo
2025-06-30	A New Perspective On AI Safety Through Control Theory Methodologies	Ullrich, Lars (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg); Zimmer, Walter (Technical University of Munich); Greer, Ross (University of California Merced); et al.	IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems, vol. accepted, to be published, pp. 1-27	10.5281/zenodo.15773895 Zenodo
2025-07-01	Qualifizierung von Open-Source-Softwarebausteinen für das automatisierte Fahren	Woopen, Timo; et. al (TC)	38. VDI-Tagung Fahrerassistenzsysteme und Automatisiertes Fahren	https://www.vdi-wissensforum.de/weiterbildung-automobil/vdivw-tagung-fahrerassistenzsysteme/
2025-07-18	HeCoFuse: Cross-Modal Complementary V2X Cooperative Perception with Heterogeneous Sensors	Wei, Chuheng (University of California, Riverside); Qin, Ziye (University of California, Riverside); Zimmer, Walter (Technical University of Munich); et al.		10.48550/arXiv.2507.13677 Zenodo
2025-07-24	A Concept for Efficient Scalability of Automated Driving Allowing for Technical, Legal, Cultural, and Ethical Differences	Ullrich, Lars (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg); Buchholz, Michael (Universität Ulm); Petit, Jonathan (Qualcomm Technologies Inc., Boxborough, MA, USA); et al.		10.48550/arXiv.2507.18326 Zenodo
2025-08-12	Towards Deterministic DDS Communication for Secure Service-Oriented Software-Defined Vehicles	Florian Frank (Uni Passau), Dominik Püllen (Uni Passau), Alexandru Kampmann (RWTH Aachen) und Stefan Katzenbeisser (Uni Passau)	**2**0th International Conference on Availability, Reliability and Security	https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-032-00624-0_9

Datum	Titel	Autor(en)	Veranstaltung / Herausgeber	Verlinkungen
2025-08-18	Methodology for an Analysis of Influencing Factors on 3D Object Detection Performance	Kuznietsov, Anton (Technical University of Darmstadt); Schweickard, Dirk (Technical University of Darmstadt); Peters, Steven (Technical University of Darmstadt); et al.	IEEE International Conference on Autonomous and Trusted Computing (IEEE ATC), Calgary, Alberta, Canada, 18-22 August, 2025	10.48550/arXiv.2411.08482 Zenodo
2025-08-19	Towards Timing Isolation for Mixed-Criticality Communication in Software-Defined Vehicles	Meszlényi, Lóránt (University of Passau); Kahle, Julius (RWTH Aachen University); Püllen, Dominik (University of Passau); et al.	2025 IEEE International Automated Vehicle Validation Conference (IAVVC), Baden-Baden, Germany, 30.09.-02.10.2025	10.48550/arXiv.2508.13652 Zenodo
2025-09-02	ADUULM-TTB: A Scalable, Generic, and Efficient Multi-Sensor Multi-Object Tracking Toolbox	Scheible, Alexander; Herman, Charlotte, Griebel, Thomas; Buchholz, Michael; Dietmayer, Klaus (alle UULM-MRM)	2025 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems	tbd
2025-09-30	A Method for the Derivation of Functional Scenarios for the Systematic Development of Low-Speed Automated Driving Functions	Berghöfer, Moritz; Blödel, Alexander; Kreß, Philipp; Peters, Steven (TU Darmstadt); Khastgir, Siddartha (University of Warwick)	2025 IEEE International Automated Vehicle Validation Conference (IAVVC), Baden-Baden, Germany, 30.09.-02.10.2025	tbd
2025-10-07	Open-Source as a Crucial Factor for the Implementation of SDV	Woopen, Timo (TC)	34. Aachen Colloquium	https://www.aachen-colloquium.com
2025-10-07	Better Safe Than Sorry: Enhancing Arbitration Graphs for Safe and Robust Autonomous Decision-Making	Piotr Spieker, Nick Le Large, Martin Lauer (KIT-MRT)	2025 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics	https://arxiv.org/pdf/2411.10170
2025-10-16	autonomyHub Marketplace: Open-Source for Autonomous Driving	Woopen, Timo (TC)	VDI-Kongress Eliv – Electronics in Vehicles	https://www.vdi-wissensforum.de/eliv/
2025-10-16	Efficient Integration of cross platform functions onto service-oriented architectures	Thomas Schulik, Viswanatha Reddy Batchu, Ramesh Kumar Dharmapuri, Saran Gundlapalli,	ELIV International VDI Congress VDI-Verlag	https://www.vdi-wissensforum.de/eliv/

Datum	Titel	Autor(en)	Veranstaltung / Herausgeber	Verlinkungen
		Parthasarathy Nadarajan, Philipp Pelcz		
2025-10-28	TUMTraf CrossVision: A Multi-View Multi-Modal Vision Dataset for Arterial Intersection Traffic Surveillance	Zhang, Jiajie; Zhou, Xingcheng; Zimmer, Walter; Creß, Christian (Technische Universität München); et al.	2025 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES), Coventry, UK, 28-29 October 2025	tbd
2025-10-28	Automotive Middleware Performance: Comparison of FastDDS, Zenoh and vSomeIP	David Philipp Klüner and Marius Molz and Alexandru Kampmann and Stefan Kowalewski and Bassam Alrifaee	2025 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES), Coventry, UK, 28-29 October 2025	tbd
2025-11-17	Multi-Staged Framework for Safety Analysis of Offloaded Services in Distributed Intelligent Transportation Systems	Dehler, Robin; Buchholz, Michael et al. (UULM-MRM)	2025 IEEE 28th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)	tbd
2025-11-19	Multikriterielle Bewertung von Perzeptionsmodellen: Entwicklung von Methoden zur Erstellung von holistischen Metriken basierend auf Pareto-Fronten	Jonas Richter, Lorenz Bayerlein, Anton Kuznietsov, Steven Peters	Tagung Automatisiertes Fahren 2025 - Eine Tagung der TU München und des TÜV SÜD	tbd