

Schlussbericht

Safety Control Center

Safety Control Center für ein Galileo gestütztes Verkehrsszenario für autonome Shuttle Busse

Förderkennzeichen:	50NA2302A
Zuwendungsempfänger:	TOPAS
Laufzeit des Vorhabens:	01.01.2023 – 30.06.2025
Autoren:	Lennart Evers, Matthias Rick
Projektleitung:	Dr.-Ing. Mitja Echim

1 Einführung

Am Wissenschaftsstandort Bremen beschäftigen sich unterschiedliche Forschungsakteure und Industriepartner mit den Chancen und Herausforderungen der Autonomen Mobilität der Zukunft im urbanen Bereich. Hierzu zählt auch die Entwicklung und Umsetzung eines innovativen Mobilitätskonzeptes mit autonom fahrenden Shuttlebussen, für das derzeit unterschiedliche Forschungsprojekte betrieben werden. Ein wichtiges Element sind dabei Leitstände, sogenannte „Safety Control Center“ (SCC) zur Überwachung und Steuerung der Fahrzeuge im Bedarfsfall.

Im Rahmen der „Konzertierten Aktion Mobilität“ am 04.11.2019 wurde von der Bundesregierung, Vertretern aus Kommunen, Ländern und Automobilwirtschaft mit dem Positionspapier „Automatisiertes und Vernetztes Fahren und Digitalisierung der Mobilität“ beschlossen, dass Deutschland beim automatisierten Fahren und vernetzter Mobilität Vorreiter werden soll. In diesem Zusammenhang hat man sich darauf verständigt, zügig innovationsfreundliche, rechtliche und technische Rahmenbedingungen zu schaffen, um die Wirkung automatisierter, autonomer und vernetzter Fahrfunktionen im Straßenverkehr wirksam werden zu lassen. Weiter wurde mit dem 2021 eingeführten Gesetz der Bundesregierung zum autonomen Fahren (Gesetz zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes und des Pflichtversicherungsgesetzes) der erforderliche Rechtsrahmen geschaffen, verschiedene Mobilitätslösungen im normalen Verkehr zu erproben - auf allen Straßenkategorien und verkehrsträgerübergreifend auf digitalen Testfeldern.

1.1 Zielsetzung

Ziel des Vorhabens ist die Überwachung des Fahrbetriebs autonomer Fahrzeuge von einem Safety Control Center. Im Falle eines unvorhergesehenen Ereignisses können mittels des Safety Control Centers Steuersignale an das Fahrzeug gesendet werden, um die Situation aufzulösen. Der bidirektionale Datenaustausch wird hierbei über das 5G Netzwerk realisiert, welches die gesamte befahrende Strecke abdeckt. Während des Entwicklungsprozesses wird ein Onboard-Operator im Fahrzeug sein, der Eingriffe am System vornehmen kann, falls es zu einem Ereignis außerhalb der Operational Design Domain kommt. Um die ganzheitliche Sicherheit des Systems zu gewährleisten, werden Untersuchungen zu möglichen Zertifizierungen durchgeführt, welche das Gesamtsystem bezüglich Zuverlässigkeit und Sicherheit klassifizieren. Aus Sicherheitsaspekten wird das Gesamtsystem mehrstufig entwickelt und getestet, bevor es vollautonom zum Einsatz kommt. Zunächst werden alle Algorithmen unter Berücksichtigung verschiedener Szenarien in einer Simulationsumgebung im Labor getestet.

Ergänzt wird das Projekt durch die Umrüstung mehrerer Lichtsignalanlagen im Technologiepark an der Universität Bremen. Diese werden so modifiziert, dass sie ihren Status zusätzlich zur visuellen Anzeige auch über den V2X-Standard verbreiten. Das

ermöglicht es den autonomen Fahrzeugen den aktuellen Zustand unabhängig von Einschränkungen der Kamera wahrnehmen zu können.

1.2 Teilvorhabenbeschreibung

TOPAS übernahm die Koordination des Gesamtprojekts und stellte sicher, dass alle Teilvorhaben integriert und abgestimmt umgesetzt wurden. Ein zentrales Ziel war der Auf-, Ausbau und Wartung des Safety Control Centers. Hierbei lag der Fokus auf der Entwicklung einer robusten Architektur, die den kontinuierlichen Austausch von Telemetriedaten und Steuerinformationen zwischen Leitstelle und Fahrzeugen ermöglicht. Ergänzend wurde eine flexible Kommunikationslösung geschaffen, die auch unter Nutzung öffentlicher 5G-Netze eine zuverlässige und sicherer Datenübertragung sicherstellt.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Erweiterung der Bildverarbeitungssysteme der Fahrzeuge. TOPAS entwickelte ein generisches Trainings-Framework für neuronale Netze weiter, um die Erkennung von Lichtsignalanlagen und deren Zuständen – einschließlich komplexer Ampelpfeilkonfigurationen – in urbanen Kreuzungsszenarien zu ermöglichen. Hierfür wurden Multi-Label-Objektdetektion und skalierbare Trainingspipelines auf Hochleistungs-Hardware implementiert. Diese Arbeiten bilden die Grundlage für eine präzise Umfeldwahrnehmung und erhöhen die Betriebssicherheit autonomer Fahrzeuge.

Darüber hinaus wirkte TOPAS unterstützend im Zertifizierungsprozess. Ziel war es, die regulatorischen Anforderungen für den Betrieb autonomer Fahrzeuge zu erfüllen und die entsprechenden Nachweise vorzubereiten. Dies umfasste die Erstellung von Sicherheitskonzepten, die Definition der Operational Design Domain (ODD) sowie die Abstimmung mit dem Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) zur Erlangung einer Erprobungsgenehmigung.

Neben den softwareseitigen Entwicklungen wurde die Infrastruktur des SCC ausgebaut. Dazu gehörte die Ausstattung des Kontrollraums mit leistungsfähiger Hardware, Visualisierungssystemen und einer Bodenstation für flexible Testeinsätze. Die Schnittstellen zwischen Fahrzeug und Leitstand wurden vereinheitlicht, um eine plattformübergreifende Kommunikation zu ermöglichen. Ergänzend wurden mehrere Lichtsignalanlagen im Testgebiet auf den V2X-Standard umgerüstet, sodass die Fahrzeuge den Ampelstatus nicht nur visuell, sondern auch über Funkdaten zuverlässig erfassen können.

1.3 Vorausgehende und aktuelle Projekte zum autonomen Fahren

1.3.1 AO-Car

Im Projekt "AO-Car - Autonome, optimale Fahrzeugnavigation und -steuerung im Fahrzeug-Fahrgast-Nahbereich für den städtischen Bereich" haben die universitären Projektpartner im Zeitraum September 2016 bis März 2018 an Methoden zur

hochautomatisierten Navigation und Steuerung von PKW auf der Basis von innovativen Algorithmen aus der Raumfahrt geforscht. Auf Grundlage von Ergebnissen aus den vorangegangenen DLR-Projekten KaNaRiA und EnEx-CAUSE wurden Algorithmen, die ursprünglich für die Luft- und Raumfahrt entwickelt wurden, auf eine terrestrische Anwendung, ein autonom fahrendes Fahrzeug, übertragen. Ziel war es dem autonomen Fahrzeug zu ermöglichen sich auf dem Parkplatz der Universität zu lokalisieren, statischen Hindernissen auszuweichen und selbstständig Parklücken zu detektieren sowie einzuparken.

1.3.2 OPA³L

Im Forschungsprojekt OPA³L (2019 – 2023) wurden die Ergebnisse aus AO-Car auf den Vorstadt-Bereich erweitert. Konkret wurden die Algorithmen für den höheren Geschwindigkeitsbereich bis 30km/h erweitert und insbesondere dynamische Hindernisse aufgenommen. Während des ausgewählten Szenarios war das Fahrzeug selbstständig in der Lage einer Straße in Bremen Borgfeld zu folgen und dort Hindernissen auszuweichen und vorausfahrenden Fahrzeugen zu folgen. Hierzu wurden GNSS-Lösungen und hochgenaue Karten eingesetzt. Ergänzt wurde das Projekt durch Forschung zum kooperativen autonomen Fahren. Hierbei wurden auf einem Testgelände verschiedene Manöver erprobt, bei denen die Fahrzeuge Daten untereinander austauschten.

1.3.3 MUTIG-VORAN

Die Konzepte aus den vorausgehenden Projekten wurden in MUTIG-VORAN (2022 -2025) fortgeführt und auf mehreren Szenarien erprobt. Ziel war es, die Übertragbarkeit der Algorithmen auf andere Situationen und Umgebungen zu demonstrieren. Weiterhin wurde die Übertragbarkeit auf weitere Forschungsfahrzeuge gezeigt und ein einheitliches Framework geschaffen. Hinzu kam die Reaktion der Entscheidungsfindung auf V2X-Daten von Lichtsignalanlagen am Campus der Universität. Diese konnten mit der visuellen Erkennung abgeglichen werden und ergänzten somit das System optimal.

1.4 Anwendungsszenario

Das ursprüngliche Anwendungsszenario sah einen testweisen Transport von Mitarbeitenden im Neustädter Hafen in Bremen vor. Ziel war es, den individuellen Verkehr zu vermindern und dadurch die Betriebssicherheit zu erhöhen. Die Überwachung des Shuttles sollte hierfür über ein Kontrollzentrum erfolgen, aus welchem alle relevanten Fahrzeugdaten überwacht werden können. Zur Kommunikation mit dem Fahrzeug war ein privates 5G-Netzwerk vorgesehen, welches eine performante und sichere Datenübertragung gewährleisten sollte.

Zur Projektlaufzeit war jedoch kein Betrieb im Hafengelände mehr möglich, sodass ein Wechsel des Szenarios zum Campus der Universität Bremen stattfand. Da es sich hierbei um kein Privatgelände handelt, mussten mehrere Änderungen vorgenommen werden. So wurde auf den Aufbau des privaten 5G-Netzwerkes verzichtet und

stattdessen auf das öffentliche 5G Netz zurückgegriffen. Zusätzlich war es nicht möglich, das gewünschte Shuttle einzusetzen, da dieses keine Straßenzulassung besitzt, daher wurde auf andere Forschungsfahrzeuge zurückgegriffen. Da das Campus-Szenario eine Vielzahl von Kreuzungssituationen aufweist, wurden die Gelder, die zum Aufbau des 5G-Netzwerkes vorgesehen waren, für die Umrüstung von Lichtsignalanlagen (LSA) auf V2X-Standard genutzt. Hierdurch ist es dem Fahrzeug möglich, unabhängig von der visuellen Erkennung der Kamera den aktuellen Zustand der LSA auszulesen.

2 Aufgabenstellung

2.1 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Das Projekt Safety Control Center (SCC) baut auf einem bereits weit fortgeschrittenen Stand von Forschung und Technik im Bereich des automatisierten und autonomen Fahrens, der funktionalen und funktionalen Sicherheit im weiteren Sinne sowie der vernetzten Verkehrssysteme auf. Im Zentrum stehen dabei drei Themenfelder, an die SCC unmittelbar anknüpft:

1. hoch- und vollautomatisierte Fahrfunktionen im Sinne von SAE J3016,
2. Kommunikation zwischen Fahrzeug, Infrastruktur und Backend (C-ITS/V2X) und
3. Leitstands- und Teleoperationskonzepte auf Basis von 4G/5G-Mobilfunk.

Im Folgenden wird der für SCC relevante Stand kurz skizziert.

2.1.1 Automatisiertes und autonomes Fahren

Die konzeptionelle Einordnung des Projekts SCC erfolgt vor dem Hintergrund der allgemein etablierten Stufen des automatisierten Fahrens (z. B. nach SAE J3016), im Mittelpunkt steht jedoch der in vorangegangenen Projekten bereits entwickelte Software-Stack für autonomes Fahren. Über mehrere Projektphasen hinweg wurde ein vollständiger „Sense–Plan–Act“-Stack aufgebaut, der auf LiDAR-, Kamera- und GNSS-Sensorik basiert und im Projekt SCC direkt weiterverwendet und erweitert wird.

Im Projekt AO-Car wurden zunächst grundlegende Komponenten für Wahrnehmung, Trajektorienplanung und Regelung in einem stark kontrollierten Umfeld erprobt. Das autonome Fahren fand hier auf einem abgesperrten Parkplatz statt, mit klar definierten Strecken und sehr begrenzten Umwelteinflüssen. Ziel war es, grundlegende Algorithmen für Trajektorienplanung und Fahrdynamikregelung zu entwickeln und die durchgängige Kette von Sensordatenerfassung über Umgebungsmodell und Planung bis zur Aktorik („Sense–Plan–Act“) erstmals end-to-end im Fahrzeug zu testen.

Aufbauend darauf wurde im Projekt OPA³L der gleiche Stack in eine etwas anspruchsvollere, aber weiterhin klar begrenzte Betriebsumgebung (ODD) übertragen: Fahrten in einer Wohngegend bzw. 30 km/h-Zone mit überschaubarem Verkehrsaufkommen. Hier wurden insbesondere die Robustheit der Lokalisierung, die Interaktion mit realem (wenn auch dünnem) Mischverkehr sowie die Stabilität der

Trajektorienplanung im kontinuierlichen Betrieb untersucht. OPA³L markiert damit den Schritt von reinen Testflächen hin zu ersten realen, wenn auch stark eingeschränkten, öffentlichen Verkehrsszenarien.

Das parallel zum Safety Control Center laufende Projekt MUTIG-VORAN erweitert diesen Ansatz auf komplexere urbane Fahrszenarien. Der bestehende Software-Stack wurde dort so weiterentwickelt, dass auch dichter Verkehr, variantenreiche Straßengeometrien und innerstädtische Situationen mit wechselnden Randbedingungen bewältigt werden können. Auf Wahrnehmungsseite kommen hierbei insbesondere LiDAR-basierte 3D-Umgebungsmodelle, kamerabasierte Objekterkennung und semantische Segmentierung sowie GNSS-gestützte Lokalisierung in Kombination mit weiteren Odometriequellen zum Einsatz. Die Planungs- und Entscheidungslogik verarbeitet diese Informationen zu Trajektorien, die in verschiedenen städtischen Szenarien erprobt wurden.

Über diese Projekte hinweg ist somit ein vollständiger, praxiserprobter Software-Stack für autonomes Fahren entstanden, der die Kette *Sensorik (LiDAR, Kameras, GNSS) → Wahrnehmung und Umgebungsmodell → Trajektorienplanung → Fahrzeugregelung*

durchgängig abdeckt. Genau an diesen Stand knüpft SCC an: Der bestehende Stack bildet die fahrzeugseitige Basis, die im Projekt SCC insbesondere um Funktionen für

- das Fahren in Szenarien mit Ampelkreuzungen und
- die Anbindung an einen Leitstand zur Überwachung und ggf. Fernsteuerung

erweitert wird. Während AO-Car, OPA³L und MUTIG-VORAN primär die autonome Fahrfunktion im Fahrzeug adressieren, ergänzt SCC diese um eine übergeordnete Safety-Ebene in Form eines Safety Control Centers, das auf den bestehenden Software-Komponenten aufsetzt und diese für den Leitstandsbetrieb sichtbar und steuerbar macht.

2.1.2 Sicherheits- und Zulassungsrahmen (funktionale Sicherheit, SOTIF, Cyber-Sicherheit)

Die technische Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen ist eingebettet in einen inzwischen breit etablierten Normen- und Regulierungsrahmen, der für SCC den Hintergrund bildet:

- Die Norm ISO 26262 „Road vehicles – Functional safety“ legt einen sicherheitsgerichteten Entwicklungslebenszyklus für elektrische/elektronische Systeme im Fahrzeug fest, inklusive Gefährdungsanalyse, Ableitung von Sicherheitsanforderungen (ASIL) und Verifikation/Validierung.
- Ergänzend adressiert ISO 21448 „Safety of the Intended Functionality“ (SOTIF) Risiken, die nicht durch klassische Fehlfunktionen, sondern durch funktionale

Unzulänglichkeiten entstehen – etwa unvollständige Sensorsicht, unzureichende Trainingsdaten für KI oder Fehlinterpretationen komplexer Verkehrssituationen.

Für SCC ist dieser normative Rahmen vor allem aus zwei Gründen relevant:

Er definiert, unter welchen Randbedingungen automatisierte Fahrzeuge überhaupt in Betrieb genommen werden dürfen, und er verdeutlicht, dass Leitstand, Teleoperation und Backend-Systeme integraler Bestandteil des Sicherheits- und Cyber-Security-Konzepts sein müssen.

Der Schwerpunkt des Projekts liegt dabei nicht auf der direkten Normenimplementierung, sondern auf der Entwicklung eines technisch tragfähigen Leitstandskonzepts, das sich in diese regulativen Rahmen einfügt.

2.1.3 Vernetzte und kooperative Verkehrssysteme (C-ITS / V2X)

Die zweite zentrale Säule des Projekts ist die Kommunikation zwischen Fahrzeug, Infrastruktur und Backend. Unter dem Begriff Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS) werden Technologien zusammengefasst, die Fahrzeug-zu-Fahrzeug- (V2V), Fahrzeug-zu-Infrastruktur- (V2I) und Infrastruktur-zu-Infrastruktur-Kommunikation (I2I) ermöglichen, um Verkehrssicherheit und -effizienz zu erhöhen.

In Europa bildet der Standardisierungsstrang rund um ETSI ITS-G5 (basierend auf IEEE 802.11p) eine wichtige technische Grundlage. ITS-G5 definiert den Zugriffs- und Protokollstack im 5-GHz-Band für Fahrzeugkommunikation und wird insbesondere für kurzreichweitige, lokale Kommunikation mit niedriger Latenz eingesetzt.

Darauf aufbauend sind u. a. die Cooperative Awareness Messages (CAM) und die Decentralized Environmental Notification Messages (DENM) standardisiert, mit denen Fahrzeuge ihren Status (Position, Geschwindigkeit, Richtung) und Ereignisse (z. B. Gefahrstellen, Baustellen) austauschen.

Parallel dazu haben sich zellulare V2X-Ansätze (C-V2X) auf Basis von LTE/4G und 5G etabliert. Diese bieten höhere Reichweiten und eine direkte Anbindung an Backend-Systeme und Leitstände. Aus heutiger Sicht gilt eine hybride Architektur aus ITSG5 und C-V2X als Stand der Technik, um sowohl lokale kooperative Funktionen (z. B. Kollisionswarnung) als auch cloud- und leitstandbasierte Dienste zu unterstützen.

Für Ampelkreuzungen – ein Kernszenario des SCC – wurden speziell Nachrichtenformate für die Übermittlung von Signalphasen und Kreuzungsgeometrien entwickelt, insbesondere SPaT- (Signal Phase and Timing) und MAP-Nachrichten. Diese ermöglichen es Fahrzeugen, aktuelle und prognostizierte Signalzustände sowie die Knotenpunkttopologie direkt von der Lichtsignalanlage zu beziehen und in die Trajektorienplanung einzubeziehen.

SCC knüpft an diesen Stand an, indem es:

- fahrzeugseitige Perzeption (z. B. kamerabasierte Ampelerkennung) mit infrastrukturseitigen Informationen kombinierbar macht und
- die Verfügbarkeit geeigneter Kommunikationskanäle (fahrzeugnah über ITS-G5/C-V2X, leitstandnah über 4G/5G) als technische Voraussetzung für ein Safety Control Center voraussetzt.

2.1.4 Leitstand, Teleoperation und 4G/5G-Kommunikation

Mit zunehmender Automatisierung wächst der Bedarf, Fahrzeuge aus der Ferne zu überwachen und bei Bedarf zu unterstützen oder zu übernehmen. Unter dem Begriff Teleoperation oder „Tele-Driving“ werden Konzepte zusammengefasst, bei denen ein Operator in einem Leitstand über Video- und Datenverbindungen das Umfeld des Fahrzeugs wahrnimmt und Steuerbefehle senden kann. Teleoperation wird dabei zunehmend als ergänzende Sicherheits- und Betriebsstrategie für automatisierte Fahrzeuge verstanden – insbesondere für seltene, komplexe oder nicht antizipierte Situationen.

Technisch stützt sich Teleoperation heute überwiegend auf Mobilfunknetze (4G/5G). 5G verspricht im Idealfall sehr geringe Latenzen und hohe Datenraten, die die Übertragung mehrerer Kamerastreams und Perzeptionsdaten in quasi Echtzeit erlauben. Experimentelle Arbeiten zu 5G-gestützten Teleoperated-Driving-Systemen zeigen, dass sich damit zwar grundsätzlich fernbediente Fahrten in realen Umgebungen realisieren lassen, gleichzeitig aber Latenzschwankungen und Netzüberlastungen eine zentrale Herausforderung für die stabile Fahrzeugführung bleiben.

Studien analysieren den Einfluss der Netzlatenz auf die laterale Fahrzeugführung und das subjektive Erleben der Bediener und leiten daraus Anforderungen an adaptive Geschwindigkeitsprofile, HMI-Design und Betriebsgrenzen ab.

Parallel dazu entstehen Pilot- und Demonstrationsprojekte, in denen Teleoperation im industriellen oder öffentlichen Umfeld erprobt wird – etwa 5G-gestützte Fernsteuerung von Lkw oder Shuttle-Fahrzeugen auf Testgeländen und in abgegrenzten städtischen Bereichen.

Diese Aktivitäten zeigen, dass Leitstands- und Teleoperationskonzepte technisch umsetzbar sind, heute aber in der Regel nur unter kontrollierten Bedingungen eingesetzt werden.

Für SCC sind aus diesem Stand der Technik insbesondere folgende Aspekte leitend:

- Ein Safety Control Center benötigt Kamerabilder und Perzeptionsdaten mit ausreichend geringer Latenz und Qualität, um den Fahrzeugzustand und die Umgebung beurteilen zu können. Dies ist direkt verknüpft mit der Auswahl

geeigneter Bildkodierungs- und Streamingverfahren über 4G/5G, wie sie im Projekt praktisch untersucht wurden.

- Die Latenz- und Bandbreitencharakteristik öffentlicher 4G/5G-Netze macht es erforderlich, Betriebsstrategien zu entwickeln, die zwischen autonomen Fahrfunktionen im Fahrzeug und Teleoperation aus dem Leitstand sinnvoll vermitteln.
- Leitstand, Fahrzeug und Infrastruktur bilden zusammen ein System-of-Systems, das sowohl technisch als auch aus Sicht von Funktionaler Sicherheit, SOTIF und Cyber-Security betrachtet werden muss.

Vor diesem Hintergrund versteht sich SCC nicht als isolierter technischer Demonstrator, sondern als konsequente Weiterentwicklung des bestehenden Standes von automatisiertem Fahren, C-ITS/V2X und Teleoperation hin zu einem integrierten Safety Control Center, das insbesondere in anspruchsvollen urbanen Szenarien mit Ampelkreuzungen zusätzliche Sicherheit und Beherrschbarkeit schaffen soll.

2.2 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Arbeiten der Universität Bremen sind unmittelbar in das Verbundprojekt eingebettet und erfordern eine enge Kooperation mit verschiedenen Partnern:

- **AG Optimierung und Optimale Steuerung (Uni Bremen):** Weiterentwicklung der Entscheidungs-, Regelungs- und Planungsalgorithmen sowie Bereitstellung und Pflege des fahrzeugseitigen Software-Stacks.
- **AG Kognitive Neuroinformatik (Uni Bremen):** Beitrag zur Lokalisierungs- und Sensorfusionspipeline, insbesondere zur Auswertung von IMU-, GNSS- und LiDAR-Daten sowie zur Stabilisierung der Zustandsschätzung über konsistente Frame- und Kartenstrukturen.
- **CGI:** Nutzung der Kommunikationsmodule und Verschlüsselungsinfrastruktur, über die Fahrzeug- und Simulationsdaten sicher an das SCC übertragen werden.
- **Verified:** Nutzung der Szenariengenerierung und automatisierten Testinfrastruktur zur Validierung von Algorithmen und Fahrverhalten.
- **Amt für Straßen und Verkehr (ASV):** Zusammenarbeit bei der Umrüstung der Lichtsignalanlagen am Campus auf den V2X-Standard sowie Nutzung der bereitgestellten MAP-/SPAT-Strukturen für die taktische Entscheidung.

3 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse

3.1 Aufbau SCC-Raum

Es wurde erkannt, dass der zur Verfügung gestellte Raum für die Anforderungen des Projekts erweitert werden musste. So wurden folgende Hardware-Komponenten für die Realisierung angeschafft:

- Lenkräder
- Leistungsstarke Grafikkarten
- Leistungsstarker Tablet-PC
- KI-Server
- KVM-Lösung
- Bodenstation als Erweiterung

Mithilfe der Lenkräder konnte getestet werden, ob es mit dem entwickelten System möglich ist, die Fahrzeuge aus dem Kontrollraum zu steuern. Die KVM-Lösung (Keyboard-Video-Maus) ist ein Produkt der Firma Barco, mit welcher die Kommunikation zwischen den im Projekt eingesetzten Rechnern und Fahrzeugen sowie der Bodenstation ermöglicht wurde. Somit ist nicht nur die Einbindung der Visualisierungssoftware des Projekts möglich, Streams können auch direkt aus den Fahrzeugen heraus an das Kontrollzentrum geschickt werden. Ebenso ist durch die KVM-Lösung die Anbindung des Lenkrads möglich.

Die Rechner des Kontrollzentrums konnten mit leistungsstarken Grafikkarten erweitert werden, um den komplexen Anforderungen Stand zu halten, somit konnten Bottlenecks bei der Hardware umgangen werden. Erweitert wurde der Raum zudem mit einer Bodenstation, welche es ermöglichen kann, die Fahrzeuge auch mit Sichtkontakt zu überwachen. Zudem ermöglicht die Bodenstation die fachgerechte Ansteuerung des EasyMiles, welche aufgrund der Bauweise mit dem Lenkrad nur erschwert möglich wäre. Da es nicht möglich ist, dass sich zu jeder Testzeit jemand im Kontrollzentrum aufhält, da beispielsweise alle Projektbeteiligten auf dem Testgelände des EasyMiles benötigt werden, kann mit der Bodenstation aufgrund der örtlichen Unabhängigkeit wegen der transportablen Bauweise Abhilfe geschaffen werden.

Über ein Tablet-PC ist es ein schneller Zugriff auf die SCC-Software bzw. dessen Visualisierung möglich.

3.2 Interfaces zwischen Fahrzeug und Leitstand

Zur Kommunikation zwischen den Fahrzeugen und dem Leitstand wurden mehrere Nachrichten in einem ICD (Interface Control Document) festgelegt. Hierbei wurde darauf geachtet, die Nachrichten kompakt zu halten, damit sie so klein wie möglich bleiben.

Jede Nachricht ist mit einem Header ausgestattet, der folgende Informationen enthält

- Time
 - Zeit, zu der die Nachricht versendet wurde in UTC
- Sender ID
 - Eindeutige ID des Senders
- Receiver ID
 - Eindeutige ID des Empfängers
- Sequence ID
 - Vorlaufende ID der Nachricht

3.2.1 Nachrichten vom Fahrzeug zum SCC

- Vehicle Status Message
 - Status der Software-Module
 - Fahrzeug-Status (Tür offen, Licht an, Batteriestatus, etc.)
 - Steuerungs-Modus: Autonom, Handbetrieb
 - Fahr-Modus: Fahren, Gestoppt, an Haltestelle
- State Estimate Message
 - Position in WGS84
- Routing Message
 - Liste mit Routen-Segmenten, die abgefahren werden
- Prediction Message
 - Aussagen über die nächsten Steuerabsichten des Fahrzeuges
- Obstacle Message (static)
 - Hinderniskarte der näheren Umgebung
- Obstacle Message (dynamic)
 - Vorhergesagte Trajektorien, von detektierten (dynamischen) Hindernissen
- Camera Picture Message
 - Kamerabilder der verbauten Kameras
- Direct Remote Control Feedback Message
 - Feedback Nachricht als Antwort auf Steuerbefehle

3.2.2 Nachrichten vom SCC zum Fahrzeug

- Set Remote Control Mode Message
 - Einstellungen zum Steuerungsverhalten
- Direct Remote Control Message
 - Nachricht für die direkte Steuerung des Fahrzeuges
- Utility Remote Control Message
 - Möglichkeit zur Aktivierung diverser fahrzeugspezifischer Systeme
 - Blinker
 - Licht

- Personen-Warnern (Klingel)
- Indirect Remote Control Message
 - Vorgabe von Wegpunkten, denen das Fahrzeug folgen soll
- Emergency Stop Message
 - Anfrage das Fahrzeug unmittelbar zu stoppen
- Set Driving Parameter Message
 - Möglichkeit Parametereinstellungen des Fahrzeuges zu verändern
- Frequency Request Message
 - Die Datenraten der Nachrichten, die vom Fahrzeug ans SCC gesendet werden, können über diese Nachricht angepasst werden

3.3 Trainings Framework für Neuronale Netze

Im Teilprojekt von TOPAS wurde ein generisches Trainings-Framework für tiefe neuronale Netze weiterentwickelt, das bereits im Vorgängerprojekt MUTIG-VORAN grundlegend konzipiert und implementiert wurde. Ziel war es, eine skalierbare und modular erweiterbare Infrastruktur bereitzustellen, mit der unterschiedliche Perzeptionsaufgaben für das autonome Fahren effizient trainiert, ausgewertet und in die Gesamtarchitektur des Safety Control Centers (SCC) integriert werden können.

Im Kontext von SCC standen insbesondere zwei Anforderungen im Vordergrund:

- die Erweiterung der bestehenden Multi-Task-Architektur auf Multi-Label-Objektdetektion sehr kleiner Objekte (Ampeln und Ampelpfeile) in komplexen Kreuzungsszenarien und
- die Skalierung des Trainings auf neue Hochleistungs-Hardware mit mehreren GPUs und großer CPU-Kapazität, um kurze Iterationszyklen und umfangreiche Experimente zu ermöglichen.

3.3.1 Ausgangspunkt aus MUTIG-VORAN

Im Projekt MUTIG-VORAN wurde durch TOPAS ein erstes, generisches Trainings-Framework aufgebaut, das folgende Eigenschaften aufwies:

- Single-Encoder-Multi-Decoder-Architektur:
Ein gemeinsamer Encoder (Backbone-Netzwerk) extrahiert Merkmalsrepräsentationen aus Bilddaten, auf die mehrere spezialisierte Decoder für unterschiedliche Tasks aufsetzen (z. B. Klassifikation, semantische Segmentierung, Objektdetektion).
- Multi-Task-Training:
Die gleichzeitige Optimierung mehrerer Aufgaben in einem gemeinsamen Modell ermöglicht die Nutzung geteilter Repräsentationen und reduziert den Gesamtaufwand für Training und Deployment.

- **Decoder-Architektur für Anchorless Single-Shot-Detektion:**
Das Detektionsmodul basiert auf einem anchorless Single-Shot-Ansatz, der sich an FCOS-ähnlichen Verfahren orientiert. Die verwendete Feature-Hierarchie folgt dem Prinzip einer inversen Feature-Pyramide, wie sie in neueren YOLO-Varianten eingesetzt wird. Dies ermöglicht:
 - eine effiziente Nutzung hochauflöster Feature Maps für kleine Objekte,
 - eine robuste Lokalisierung von Ampeln im Subpixel- bzw. Tensor-Subpixelbereich und
 - eine direkte Vorhersage von Bounding-Box-Parametern ohne vorgeschaltete Ankerdefinition.
- **Konfigurierbare Trainings-Pipelines:**
Datensätze, Augmentierungen, Optimierungsparameter und Loss-Gewichtungen sind über Konfigurationsdateien definierbar, wodurch sich neue Szenarien schnell integrieren lassen.

Dieses Fundament bildete die Basis für die Arbeiten im Projekt SCC, in dem das Framework gezielt an die Anforderungen des Safety Control Centers und der neuen Kreuzungsszenarien angepasst wurde.

3.3.2 Erweiterung auf Multi-Label-Objektdetektion sehr kleiner Objekte

Mit dem neuen Szenario „Ampelkreuzungen“ ergab sich die Notwendigkeit, Ampelanlagen in hoher Entfernung und damit sehr hohen Bildauflösungen robust zu erkennen und gleichzeitig ihren Zustand zu klassifizieren. Hinzu kommt die Unterscheidung von Ampelpfeilen, die für Abbiegebeziehungen relevant sind. Daraus resultiert eine Multi-Label-Objektdetektion, bei der pro erkannter Ampel mehrere, unabhängige Labels vorhergesagt werden (Position, Grundzustand und Pfeilzustände).

Auf Seiten von TOPAS wurden hierfür im Trainings-Framework folgende Erweiterungen umgesetzt:

- **Definition von Zielfunktionen für Multi-Label-Klassen:**
Für die Multi-Label-Vorhersage wurden Zielfunktionen definiert, die den Grundzustand der Ampel (rot, gelb, grün, gelb-rot) als auch die Präsenz und Zustände von Ampelpfeilen abbilden. Dabei wurden:
 - Aufbauend auf die bestehende anchorless single-shot-Detektion geeignete Loss-Funktionen für Mehrklassen- und Mehrlabel-Ausgaben integriert,
 - Mechanismen zur Gewichtung seltener Klassen (z. B. gelb oder gelb-rot) berücksichtigt und
 - Schnittstellen geschaffen, über die die AG Optimierung und Optimale Steuerung ihre Ampel-Datensätze und Labeldefinitionen direkt im Framework nutzen kann.

- Anpassung des Box-Cell-Matching für sehr kleine Objekte: Eine besondere Herausforderung waren Ampeln, deren Bounding-Boxes im projizierten Bildbereich nur wenige Pixel groß sind. Das klassische Matching von Ground-Truth-Boxen zu Zellen auf den Feature Maps führt in solchen Fällen schnell zu instabilen Zuordnungen. Daher wurden:
 - die Zuordnungslogik („Box-Cell-Matching“) so erweitert, dass auch Objekte unterhalb einer Pixel-Schwelle konsistent einer begrenzten Menge von Zellen zugeordnet werden können,
 - Rundungsfehler bei der Projektion von Box-Koordinaten auf die Feature-Map adressiert und
 - Heuristiken eingeführt, die einen minimalen effektiven Repräsentationsbereich je Objekt sicherstellen, ohne die Trainingsdaten künstlich zu verzerren.

Das Ergebnis ist eine Detektionsarchitektur, die den speziellen Anforderungen von Ampelkreuzungen gerecht wird und gleichzeitig in das bestehende Multi-Task-Framework integriert bleibt. Die AG Optimierung und Optimale Steuerung der Universität Bremen konnte dieses erweiterte Framework nutzen, um ihre Ampeldatensätze mit den neuen Multi-Label-Decoder-Varianten zu trainieren.

3.3.3 Skalierung des Trainings auf Hochleistungs-Hardware

Ein weiterer Arbeitsschwerpunkt von TOPAS lag auf der Skalierung des Trainings auf eine neue, leistungsfähige Hardwareplattform mit 8× H100-GPUs und zwei 96-Kern-CPUs (insg. 384 Threads) bei 2 TB RAM. Um diese Ressourcen effizient zu nutzen, waren tiefgreifende Änderungen an der Trainingsinfrastruktur erforderlich:

- Umstellung von `nn.DataParallel` auf `DistributedDataParallel (DDP)`: Die bisher in MUTIG-VORAN eingesetzte Datenparallelisierung über `nn.DataParallel` skaliert nur eingeschränkt auf viele GPUs und führt zu Engpässen auf einer „Master-GPU“. Im Rahmen von SCC wurde das Framework auf `DistributedDataParallel (DDP)` in PyTorch umgestellt. Dabei:
 - wird pro GPU ein separater Trainingsprozess gestartet,
 - erfolgt die Gradientenaggregation effizient verteilt und
 - lässt sich die Skalierung auf bis zu acht GPUs nahezu linear ausnutzen, abhängig von Modellgröße und Batch-Konfiguration.
- Parallelisierung der Data-Loading-Pipeline: Um die GPUs optimal auszulasten, musste die Datenbereitstellung (Laden, Dekodieren, Augmentieren) massiv parallelisiert und entkoppelt werden. Dazu wurden:

- geeignete Einstellungen für Anzahl und CPU-Bindung der DataLoader-Worker gewählt,
- Caching- und Prefetch-Mechanismen eingesetzt, um I/O-Latenzen zu minimieren, und
- die Integration mit großen Hauptspeicherkapazitäten genutzt, um auch umfangreiche Datensätze und Vorverarbeitungsartefakte im Speicher zu halten.
- Robuste Konfiguration für große Batchgrößen und hohe Auflösungen: Die neue Hardware ermöglicht größere Batchgrößen und höhere Eingangsaufösungen, was insbesondere für die Detektion kleiner Ampeln von Vorteil ist. Das Trainings-Framework wurde so erweitert, dass:
 - Gradienten-Akkumulation und dynamische Anpassung der Lernrate unterstützt werden,
 - Speichergrenzen pro GPU überwacht und über Konfigurationsparameter gesteuert werden können und
 - die Reproduzierbarkeit von Experimenten trotz verteilter Trainingsläufe gewährleistet bleibt (Seed-Management, Logging).

Durch diese Maßnahmen konnte das Trainings-Framework so skaliert werden, dass komplexe Multi-Task- und Multi-Label-Modelle im SCC-Kontext in vertretbarer Zeit trainiert und iterativ verbessert werden können.

3.3.4 Bereitstellung von Perception Daten für die Übertragung in das RCC

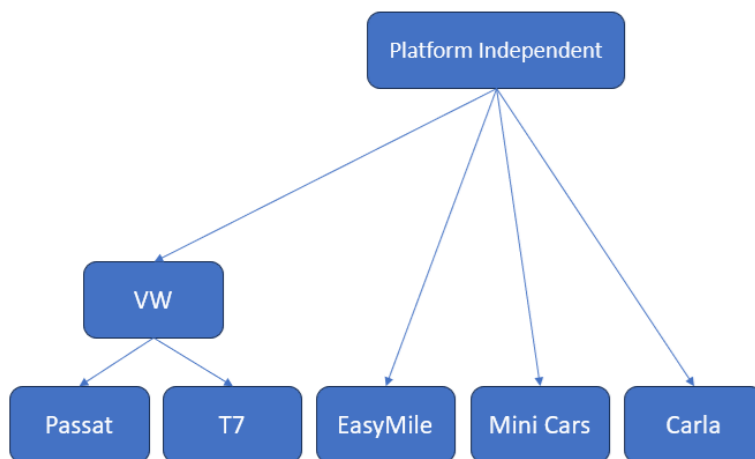
TOPAS war für die kamerabasierte Bildakquisition im Fahrzeug sowie für die Übertragung der Bild- und Perzeptionsdaten zu den Schnittstellen in den Leitstand verantwortlich. Die Kameras auf den Plattformen VW Passat (4G), VW T7 (5G) und EasyMile EZ10 (5G) lieferten dabei sowohl die Basis für die visuelle Leitstandsüberwachung als auch Daten für die Perzeptionsmodule.

Zur Bewertung verschiedener Bildencodings wurde eine minimale GStreamer-Pipeline mit udpsink auf Fahrzeugseite und udpsrc im Leitstand aufgebaut und systematisch hinsichtlich Minimallatenz und Eignung für Echtzeitüberwachung und Fernsteuerung untersucht. Verglichen wurden JPEG (Einzelbildkompression), H.264 und H.265. Dabei zeigte sich, dass JPEG die geringste Ende-zu-Ende-Latenz erreicht, bei im Vergleich zwar schlechterer, aber im Rahmen der zur Verfügung stehenden Mobilfunkbandbreite immer noch gut nutzbarer Bildqualität. H.264/H.265 wurden zusätzlich auf niedrige Latenz getuned (u. a. All-I-Frames, reduzierte Inter-Frame-Kompression), wodurch ihr Qualitätsvorteil gegenüber einfacher (Motion-)JPEG-Kompression deutlich schrumpft. Vor diesem Hintergrund wurde für den regulären Fahrzeugbetrieb die Übertragung der Kamerabilder als JPEG-Stream festgelegt, da diese Variante das beste Verhältnis aus Einfachheit, Robustheit und Latenz bietet.

Neben den Kamerabildern hat TOPAS auch die Visualisierung und Übertragung weiterer Perception-Resultate umgesetzt. Die statische Hinderniskarte wird als planare Bird's-Eye-View über dem Fahrzeug dargestellt, die semantische Karte des Umgebungsbodens ebenfalls als 2D-BEV, in der jeder Bodenpunkt Klassen wie „Straße“, „Gehweg“, „Haltelinie“, „durchgezogene Linie“ oder „gestrichelte Linie“ erhält. Ergänzend werden die durch die Objekterkennung detektierten Objekte als Overlays auf Kamerabildern visualisiert. Für die kartographischen und semantischen Daten wird im Gegensatz zu den Kamerastreams ein PNG-Encoding verwendet. Aufgrund der hohen Sparsity der Karten erlaubt PNG eine verlustfreie Kompression bei gleichzeitig niedrigen Übertragungsraten, sodass die Informationen im Leitstand in hoher Qualität und ohne Kompressionsartefakte für die Operatoren verfügbar sind.

3.4 Vereinheitlichung der Schnittstellen zum Fahrzeug

Innerhalb des Projektes wurden diverse Plattformen/Demonstratoren verwendet: Carla-Simulation, Miniautos, VW Passat, VW T7 & EasyMile EZ10. Um möglichst viel Code-Duplizierung zu vermeiden, wurden einheitliche, plattformunabhängige Schnittstellen definiert, die für die Kommunikation mit den unterschiedlichen Plattformen genutzt werden konnten. Diese dienen zum einen zum Extrahieren von Zustandsdaten vom Fahrzeug: Geschwindigkeit, Drehraten der Räder, Beschleunigung, Lenkwinkel, etc., aber auch um Steuersignale aus der Regelung an die unterschiedlichen Plattformen zu übermitteln.



Im Rahmen des SCC Projektes wurden diese Technik ebenfalls benutzt, um mit dem SCC zu kommunizieren.

3.5 SCC-Kommunikation

Der Datenfluss zwischen dem SCC und dem Fahrzeug wird über das *SCC-Modul* verwaltet. Dieses kümmert sich um die Datenverarbeitung und -bereitstellung. Die Eigentliche Übertragung der Daten erfolgt über ein Modul des Projektpartners CGI, welche die Daten verschlüsselt übertragen.



Die Datenaufbereitung und die Frequenz, in der die Daten verschickt werden, ist essenziell für die Performance des Gesamtsystems. Werden zu große Datenmengen übertragen, kann es schnell zu Engpässen in der Bandbreite kommen, sodass schlussendlich gar keine Daten mehr übertragen werden können. Im Projekt wurde ein Ansatz verfolgt, der es dem SCC ermöglicht, eine gewisse Datenrate vom Fahrzeug anzufragen. Dies ermöglicht es dem Operator, die Datenrate variable zu steuern. Zukünftig ist es auch denkbar, dass das Fahrzeug selbstständig die verfügbare Bandbreite bestimmt und hierrüber dann die Frequenz für bestimmte Daten selbstständig wählt.

3.6 Demonstratoren

3.6.1 Erlangung einer Erprobungsgenehmigung für die Forschungsfahrzeuge

Zu Beginn des Projektes verfügte der eingesetzte VW Passat über eine Ausnahmegenehmigung des Landes Bremen für den Betrieb im Rahmen der Forschungsaktivitäten für den öffentlichen Straßenverkehr. Diese Genehmigung war jedoch befristet und lief während des Projektverlaufs aus. Für die Fortsetzung der (autonomen) Tests musste daher eine neue Genehmigung beim Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) beantragt werden. Hintergrund ist, dass mit der Einführung des neuen Rechtsrahmens für automatisiertes Fahren die Zuständigkeit für solche Genehmigungen ab Level 3 von den Landesbehörden auf das KBA übergegangen ist. Damit soll eine bundesweit einheitliche und strengere Regulierung sichergestellt werden.

Die Beantragung einer Erprobungsgenehmigung beim KBA ist deutlich aufwendiger als die frühere Ausnahmegenehmigung. Sie erfordert die Vorlage eines umfassenden Sicherheitskonzepts, das alle relevanten Risiken adressiert und Maßnahmen zur Gefahrenminimierung beschreibt. Darüber hinaus muss eine klar definierte Operational Design Domain (ODD) vorgelegt werden, in dem die Einsatzbedingungen des Fahrzeugs präzise festgelegt sind: beispielsweise zulässige Strecken, Geschwindigkeiten, Umgebungsbedingungen und Interaktionsszenarien. Ergänzend sind detaillierte technische Dokumentationen, Nachweise zur funktionalen Sicherheit (z. B. gemäß ISO 26262) sowie eine Beschreibung der eingesetzten Softwarearchitektur erforderlich. Auch die Prozesse für Notfallmaßnahmen und die Rolle des Sicherheitsfahrers müssen transparent dargestellt werden.

Dieser Genehmigungsprozess ist zeit- und ressourcenintensiv, da er eine enge Abstimmung mit dem KBA und die Erstellung umfangreicher Unterlagen verlangt. TOPAS unterstützte hierbei die Universität Bremen mit umfangreichen Recherchen und beim

Schreiben der Anträge. Der Passat erhielt nach einer Vorort-Abnahme am 04.04.2025 die Genehmigung vom KBA für 4 Jahre (EPG00115*00).

3.6.2 Testfahrten mit Forschungsfahrzeugen zur Erprobung der Datenübertragung

Im Projekt konnte die Funktionalität des SCC erfolgreich unter Realbedingungen demonstriert werden. Der Schwerpunkt lag dabei nicht auf dem autonomen Fahren, sondern auf der Übertragung und Visualisierung von Fahrzeugdaten im SCC. Dennoch konnte das System sowohl im autonomen sowie im manuellen Modus getestet werden. Mehrere Fahrzeuge wurden in die Tests einbezogen:

3.6.2.1 VW Passat (4G)

Der Passat diente als Plattform für die Übertragung von Sensordaten über eine 4G-Verbindung. Die Daten wurden zuverlässig an das SCC übertragen und dort in Echtzeit angezeigt. Dies umfasste Fahrzeugstatus, Positionsdaten und ausgewählte Sensormessungen. Die Tests zeigten, dass 4G für grundlegende Monitoring-Funktionen ausreichend ist, jedoch bei hoher Datenlast und komplexen Visualisierungen spürbare Latenzen auftreten.

3.6.2.2 VW T7 Multivan (5G)

Der T7 nutzt die moderne 5G-Infrastruktur. Hier konnte die Überlegenheit von 5G deutlich nachgewiesen werden: Die Datenübertragung erfolgte nahezu verzögerungsfrei, was eine kontinuierliche Echtzeitdarstellung im SCC ermöglichte. Zusätzlich konnten große Datenmengen wie Videostreams und hochauflösende Sensordaten übertragen werden. Dies ist insbesondere für die spätere Integration von Teleoperations- und Sicherheitsfunktionen entscheidend. Das System ist jedoch maßgeblich von der Anzahl der Nutzer in der näheren Umgebung abhängig. Falls viele weitere Endgeräte in der aktuellen 5G-Zelle verbunden sind, sinkt die Bandbreite und die Latenz steigt. Hierzu sind jedoch weitere gezielte Tests notwendig.

3.6.2.3 EZ10 Shuttle (stationär)

Der EZ10 Shuttle wurde ebenfalls in die Tests einbezogen, allerdings nur stationär, da keine Genehmigung für den Betrieb auf öffentlichen Straßen vorlag. Dennoch konnten die Kommunikationsschnittstellen erfolgreich getestet werden. Die Daten des Shuttles wurden im SCC angezeigt, was die Interoperabilität des Systems mit unterschiedlichen Fahrzeugtypen bestätigte. Zusätzlich war es möglich passive Steuerkommandos an das Shuttle zu senden: Blinken, Tür öffnen, Klingel aktivieren, Licht ein-/ausschalten.

3.6.2.4 Fazit:

Die Tests haben gezeigt, dass die geplante Architektur funktioniert und die Datenübertragung zwischen Fahrzeugen und SCC zuverlässig realisiert werden kann. Die Unterschiede zwischen 4G und 5G waren deutlich spürbar: Während 4G für Basisfunktionen geeignet ist, bietet 5G die notwendige Performance für Echtzeitüberwachung, hochauflösende Daten und zukünftige Sicherheitsanwendungen.

Die erfolgreiche Integration des EZ10 Shuttles unterstreicht die Plattformunabhängigkeit des Systems.

3.6.3 Remote Zugriff der Miniautos

Gemäß den Vorgaben des Kraftfahrt-Bundesamtes und den Regelungen der neuen StVfer-nLV ist für das Fernsteuern eines Fahrzeugs im öffentlichen Straßenraum eine spezifische Genehmigung erforderlich. Die StVfer-nLV trat am 1. Dezember 2025 in Kraft. Derzeit besteht jedoch rechtlich keine Möglichkeit, ein Fahrzeug im realen Straßenverkehr direkt über das Safety Control Center zu steuern. Zudem ist es zum aktuellen Zeitpunkt sehr zeitaufwendig, eine solche Genehmigung zu beantragen, sodass praktische Testläufe mit realen Fahrzeugen derzeit nicht realisierbar sind.

Um die Leistungsfähigkeit und Praxistauglichkeit der entwickelten Technologien dennoch evaluieren zu können, wird ein geeigneter Demonstrator benötigt. Das von uns eingesetzte Miniaturfahrzeug stellt hierfür die optimale Plattform dar. Die Implementierung des gesamten DRIVES-Frameworks kann mit geringem Aufwand realisiert werden, und die Steuerung über das Safety Control Center ist vollständig möglich. Im Gegensatz zu einem realen Fahrzeug ist die Testumgebung vollständig kontrollierbar und erfordert keine zusätzlichen behördlichen Genehmigungen.

Im Safety Control Center werden die eingehenden Steuersignale verarbeitet und in fahrdynamisch relevante Größen übersetzt. Die Signale des Gaspedals werden auf feste, vordefinierte Geschwindigkeitswerte abgebildet, sodass das Miniaturfahrzeug ausschließlich innerhalb sicherer Geschwindigkeitsstufen betrieben wird. Ebenso wird das vom Lenkrad gelieferte Eingangssignal in einen Lenkwinkel umgerechnet und an das Miniaturfahrzeug übertragen.

Zur Erhöhung der Betriebssicherheit sind sowohl die maximal zulässige Geschwindigkeit als auch die maximale Beschleunigung softwareseitig begrenzt. Diese Sicherheitsmechanismen gewährleisten, dass sich das Fahrzeug jederzeit innerhalb definierter Grenzen bewegt und potenzielle Fehlbedienungen abgefangen werden.

Aktuell steht kein Rückkanal vom Lenksystem zum Bediener zur Verfügung. Das bedeutet, dass am physischen Lenkrad keine Rückmeldungen wie Rückstellmomente oder Kraftinformationen erzeugt werden. Die Bedienung erfolgt daher ausschließlich visuell über die Benutzerschnittstelle des Safety Control Centers.



Abbildung: Benutzung der Safety Control Center um Miniature Fahrzeuge zu steuern.

3.7 Hardware-Verbindung zwischen Lichtsignalanlage und Fahrzeug

An den im roten Kreis markierten Stellen wurden in Zusammenarbeit mit den Unternehmen YUNEX und SWARCO insgesamt fünf Lichtsignalanlagen in Bremen für V2X-Kommunikation umgerüstet. Für jede dieser Anlagen wurde eine Road Side Unit (RSU) installiert, um die relevanten V2X-Daten – insbesondere MAPAM und SPATEM Nachrichten zu senden. Über diese fünf modernisierten Lichtsignalanlagen wird der Ampelstatus kontinuierlich ausgesendet, sodass sowohl das T7-Versuchsfahrzeug als auch der Passat die Signale über die WaveBee-V2X-Box empfangen und entsprechend darauf reagieren können.



Abbildung: Verortung der V2X-fähigen Lichtsignalanlagen

Der detaillierte Prozess ist in der Abbildung dargestellt, welche die vollständige V2X-Infrastruktur der getesteten Kreuzung zeigt. Links befindet sich der geöffnete Verkehrstechnikschrank mit der integrierten Steuer- und Kommunikationshardware. Zusätzlich sind der am Mast montierte RSU-Transceiver sowie das lokale GNSS-/V2X-Modem abgebildet, die für die Erfassung und Übertragung der MAPEM-, SPATEM- und CAM-Nachrichten verantwortlich sind. Rechts ist die Visualisierung im Monitoring- und Playback-System des WaveBee-Tablets dargestellt: Die eingehenden MAPEM- und SPATEM-Informationen der Lichtsignalanlage werden dort in Echtzeit auf einer digitalen Karte fusioniert und visualisiert. Die Pfeile stellen die Verbindung und Zuordnung zwischen der physischen Infrastruktur und den im System angezeigten digitalen Datenobjekten her.

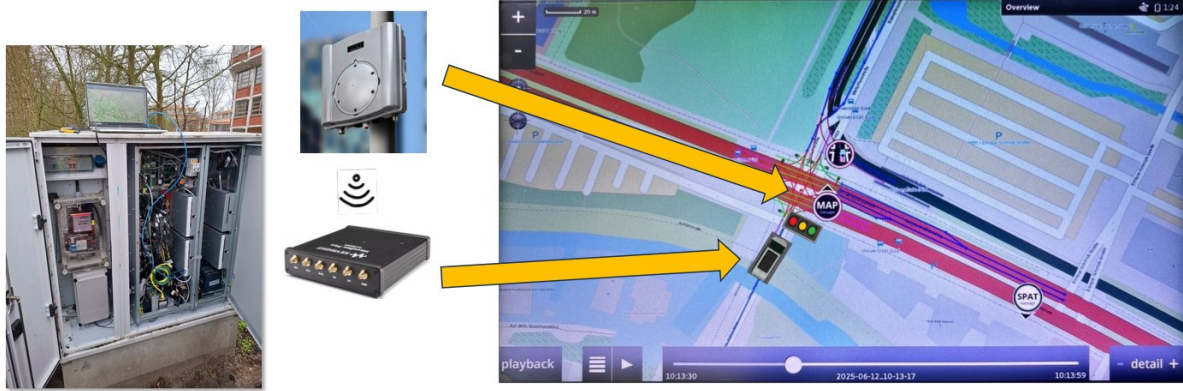


Abbildung: Hardware-Setup und MAPEM und SPATEM Visualisierung im Safety Control Center

3.8 Vicon Innenraum Lokalisierungssystem

Für die Entwicklung, Evaluierung und reproduzierbare Validierung der Steuerungs- und Planungsalgorithmen der Minifahrzeuge wird eine hochpräzise und robuste Lokalisierung benötigt. Besonders in Indoor-Umgebungen, in denen GNSS-basierte Verfahren nicht zur Verfügung stehen, ist ein verlässliches Lokalisierungssystem entscheidend, um genaue Trajektorien, Zustände und Orientierungen der Fahrzeuge zu erfassen. Zu diesem Zweck wird im vorliegenden Aufbau ein optisches Vicon-System eingesetzt, das eine millimetergenaue Bestimmung der Fahrzeugpose ermöglicht und als Ground-Truth-Quelle für alle algorithmischen Evaluierungen dient.

Die Indoor-Testfläche ist mit acht Infrarotkameras ausgerüstet, die an der Decke installiert sind und die am Fahrzeug angebrachten, infrarotreflektierenden Marker erfassen. Die Kameras senden Infrarotlicht aus, welches von diesen Markern reflektiert und zur präzisen Rekonstruktion der dreidimensionalen Position und Orientierung des Fahrzeugs verarbeitet wird. Damit wird ein vollständig markerbasiertes Tracking ermöglicht, das auch bei schnellen Manövern und komplexen Trajektorien stabil und zuverlässig bleibt.

Die entsprechende Abbildung zeigt den Aufbau (linke Seite) mit den auf dem Fahrzeug montierten Markern sowie die an der Decke befindlichen Kameramodule. Auf der rechten Seite ist die rekonstruierte Szene in der Vicon-Software dargestellt, in der sowohl die Kameraanordnung als auch die geschätzte Fahrzeugpose visualisiert sind. Diese Darstellung dient als Grundlage für die Analyse und Validierung der Algorithmen im Fahrzeugsystem.

Vor dem Einsatz des Vicon-Systems wurde die Fahrzeuglokalisierung auf Basis von ArUco-Markern durchgeführt. Dieses Verfahren zeigte jedoch insbesondere an bestimmten Bereichen der Teststrecke Einschränkungen in Genauigkeit und Robustheit. Durch die Umstellung auf das Vicon-Lokalisierungssystem stehen nun millimetergenaue

und stabil rekonstruierte Fahrzeugposen zur Verfügung, wodurch die Qualität und Verlässlichkeit der lokalen Trajektorienplanung signifikant verbessert werden konnte.

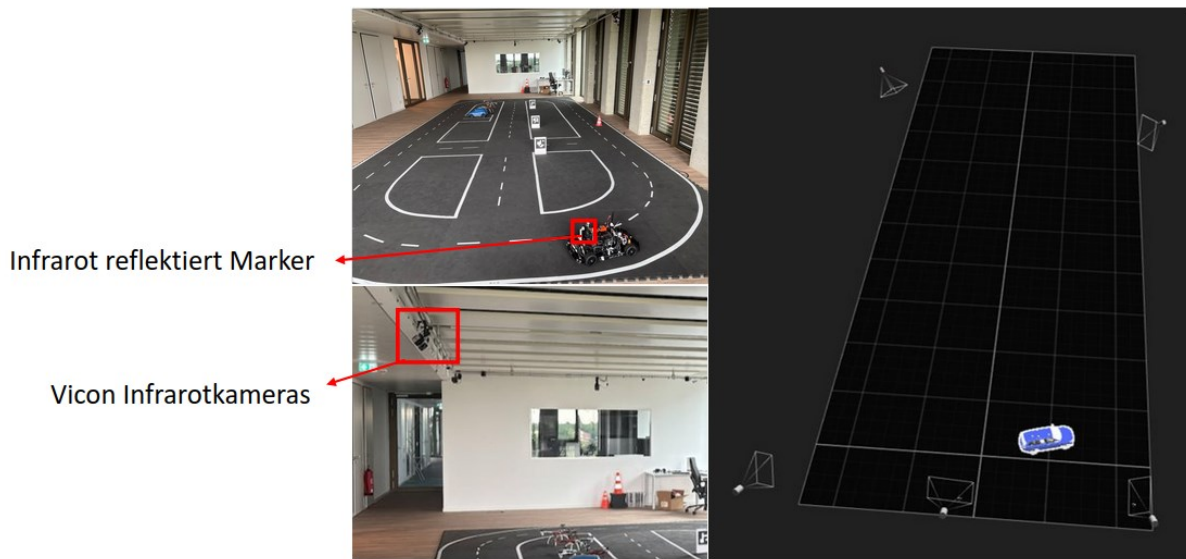


Abbildung: Lokalisierung durch Vicon-Infrarot-Tracking

4 Weitere Darstellungen

4.1 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises setzen sich aus den Ausgaben für die Mitarbeiter, der zugekauften Hardware, der Beschaffung des KI-Servers, sowie projektbezogene Reisekosten zusammen.

4.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Autonomes und hochautomatisiertes Fahren stellt ein Schlüsselthema der digitalen Transformation dar und ist für den Wissenschafts- und Industriestandort Deutschland von strategischer Bedeutung. Vor diesem Hintergrund war die Durchführung des Projekts zwingend erforderlich, um technologische Grundlagen für sichere und vernetzte Mobilität zu schaffen.

Die im Projekt erbrachten Arbeiten wurden sorgfältig geplant und konsequent an den definierten Zielen ausgerichtet. Alle Maßnahmen waren sowohl notwendig als auch angemessen, um die Funktionsfähigkeit des Safety Control Centers und die Integration in die Gesamtarchitektur sicherzustellen.

Bei unerwarteten Änderungen der Rahmenbedingungen wurde der Projektplan in enger Abstimmung mit dem Projektträger angepasst, sodass die Zielerreichung trotz veränderter Voraussetzungen gewährleistet blieb.

4.3 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

4.3.1 Folgeprojekte

Der Leitstand konnte auch im parallellaufenden Projekt MUTIG-VORAN weiter genutzt werden, um die Fahrzeuge aus der Ferne zu überwachen. Weitere direkte Folgeprojekte sind aktuell in der Beantragung, jedoch ist noch keines gestartet.

4.4 Veröffentlichungen im Rahmen des Vorhabens

- Konferenz, 24.-26.5.2023, Ausrichtung des Synergietreffens der Explorerinitiativen des DLR in Bremen
- Vortrag, 1.6. 2023, Vortrag beim Industrial Radio Day, „Vernetztes Autonomes Fahren in den Projekten MUTIG-VORAN und Safety Control Center“, M. Runge
- Key Note Vortrag, 9.11.2023, Netzwerk-Veranstaltung Abenteuer Digitalisierung im DHI Bremen, „Künstliche Intelligenz und wie sie auch in kleinen Unternehmen praktisch angewendet werden kann“, C. Büskens
- Dissertationsschrift, A. Folkers., Adaptive Bewegungsplanung für taktische Entscheidungen autonomer Fahrzeuge im urbanen Umfeld: Der generische Hybrid A*, Universität Bremen, 2023, DOI: 10.26092/elib/2080
- Konferenzpaper, X. Li, S. Patel, D. Stronzek-Pfeifer, C. Büskens. Indoor Localization for an Autonomous Model Car: A Marker-Based Multi-Sensor Fusion Framework. 2023 IEEE 19th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 26.-30.08.2023, Auckland, Neuseeland. IEEE Xplore: 28. September 2023, 2023
- Konferenzvortrag, Indoor Localization for an Autonomous Model Car: A Marker-Based Multi-Sensor Fusion Framework. 2023 IEEE 19th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 26.-30.08.2023, Auckland, Neuseeland, X.Li
- Vortrag „Safety Control Center and Simulation“ beim STE 2024-I, April 2024, C. Rachuy
- Vortrag „Semantisches Kartieren durch Kameradaten - Realwelterfahrungen“ beim STE 2024-II, Oktober 2024, L. Evers
- Vortrag „First Test Results from Safety Control Center“ beim STE 2024-II, Oktober 2024, M. Rick

4.5 Synergietreffen der DLR Explorer Initiativen

Vom 24. – 26.05.2023 wurde von TOPAS das Synergietreffen der DLR Explorer Initiativen im DHI in Bremen ausgerichtet.

4.6 Medienberichte und Pressemitteilungen

- Presseartikel, 2.2.2023, „Wir sind noch ganz am Anfang“, Artikel im Weserkurier

- Radio Interview, 9.2.2023, Radio Interview mit Bremen 4 zum Thema "KI + Autonomes Fahren", M. Rick, M.Echim
- Führung, 14.3.2023, Bürgermeister von Lilienthal im DHI, M. Runge, M. Rick, C. Büskens
- Film + Interview, 15.3. 2023, Besuch bei der Bürgermeisterin von Grasberg, M. Runge, M. Rick, C. Büskens
- Online Veranstaltung, 20.3.2023, Teilnahme am Foresight Breakfast 3 - The Future of Breakbulk and Project Cargo in 2033, M. Runge
- Podcast, 22.3.2023, Aufnahme Podcast Nordwest Digital, „Was hat Mathematik mit der digitalen Transformation zu tun“, C. Büskens, M. Echim
- Führungen, Vortrag, 24.3.2023, KI+ Digitalisierung in Bremen/Hans-Böckler-Stiftung, C. Büskens, M.Echim, M.Rick, M. Knauer, V. Dirks
- Onlinebeitrag, Avanja Role - Model, Avanja Internetartikel, M. Runge
- Girl's day, 27.4.2023, „(Industrie-)mathematik und Berufsbilder von Mathematikerinnen/Wie Mathematik Smartphones, autonomes Fahren und die Energiewende ermöglicht“, 29 Teilnehmerinnen im Alter zwischen 12 und 15, V. Dirks, M. Runge
- Workshop, 5.5.-7.5.2023, Hackathon4Ladies beim Dockone, K.Chan, M. Runge, M. Rick, M. Echim, M. Mizdrak, V. Dirks, und mehr
- Artikel im Weserkurier, 13.5.2023, Zeitungsartikel, "Sie lösen die Knobelaufgaben, an denen andere scheitern"
- Tagung, 23.5.2023, 1. Forum Industriemathematik „Autonome Mobilität in Bremen und umzu“, Podiumsdiskussion, Impulsvortrag, Führungen, Laborbesuche, gesamtes Team
- Bundesweiter Digitaltag 2023, 16.6.2023, Veranstaltung im DHI-Gebäude, verschiedene Aktionen und Exponate zum Thema Digitalisierung: Verkehrszeichenerkennung, Autonomes Fahren, gesamtes Team
- Fernsehbericht „buten un binnen“, 27.6.2023, Regionalmagazin Bremen, Bericht über KI im DHI
- Ausstellung/Messestand, 27.+28.6. 2023, Austausch/Standbetreuung bei den Bremer KI-Tagen im DHI, gesamtes Team
- Artikel in der BILD Zeitung Bremen, 28.6.2023, Artikel über die KI Tage 2023 in Bremen
- Pressemitteilung, 28.6.2023, Pressemitteilung der Senatorin für Wirtschaft, Häfen und Transformation über die KI Tage 2023 in Bremen
- Führung, 23.8.2023, Führung durch unsere Laborfläche für Teilnehmende der Studierendenkonferenz der DMV
- Forschungsmeile bei Maritimer Woche, 16. + 17.9.2023 Ausstellungspagode an der Schlachte, M. Knauer, L. Evers, K. Chan, M. Rick, V. Dirks, X. Li, C. Meerpohl, J.Phan

- Newsletterartikel, 8.10.2023, digitalmedia Newsletter zum Thema Mathematik, <https://www.bremen-digitalmedia.de/m-wie-mathematik-warum-sie-so-viel-spannender-ist-als-ihr-ruf/>
- Netzwerk-Veranstaltung, 10.10.2023, Steinbeis Tag in Bremen (DHI), C. Büskens, M. Echim, M. Knauer
- Airbus Netzwerktreffen, 14.11.2023, Airbus Netzwerktreffen, C. Büskens
- Fernsehbericht bei „buten un binnen“, 23.11.2023, "Hier wird in Bremen am autonomen Auto der Zukunft geforscht", <https://www.butenunbinnen.de/videos/autos-zukunft-elektro-mobilitaet-nahverkehr-fahren-100.html>, M. Runge, C. Büskens
- Führung, 23.11.2023, Besuch des Bürgermeisters von Bremen, Herrn Bovenschulte, Vorführung Autonomes Fahren, Präsentation unserer Arbeitsgebiete, Rundgang durch Laborfläche, TOPAS, AG UB-O2C
- Preisverleihung, 21.11.2023, MCN Cup Preisverleihung, 2. Platz für unsere TOPAS Technikern Vanessa Dierks in der Kategorie Junior Cup mit ihrem Beitrag zu ihrer Arbeit an autonomen Schiffen: "Techniker als Vermittler zwischen Welten", Hamburg
- Autonomous Systems Meetup
- Tandem Power Finale, 30.05.2024, Bremen
- KoTAM Abschlussveranstaltung, 06.06.2024, Berlin
- KoTAM Workshop Testfelder Autonomes Fahren, sonstiges Netzwerktreffen, 05.06.2024, Berlin
- Bremerhavener Wirtschaftsdialog, 16.08.2024, Bremerhaven
- Ortsbeirat Osterholz Vortrag, Präsentation vom T7, 18.04.2024
- Bremer KI-Tage, Präsentation T7, 12.06.2024
- Bremer KI-Tage, Workshop zu "ML-Modelle: Woher weiß ich, dass mein trainiertes Modell auf ungesehenen Daten funktioniert?", 12.06.2024, L. Evers
- Ischa meetHUB, Präsentation T7, 29.10.2024

4.7 Forum Industriemathematik

Zum Abschluss des Vorgängerprojektes OPA³L wurde das Forum Industriemathematik erstmalig am 23. Mai 2023 ausgerichtet. Der Fokus lag auf einem Austausch zum Themenbereich „Autonomes Fahren“. Das Format wurde in den folgenden Jahren mit unterschiedlichen Themen fortgeführt.

4.8 Autonomous Systems Meetup

TOPAS ist Ausrichter eines Meetup zum Thema „autonome Systeme“. Dabei handelt es sich um eine etablierte Community für autonome Systeme mit derzeit über 230 Mitgliedern. Das Meetup richtet sich an Studierende, professionelle Entwicklerinnen und Entwickler sowie Unternehmen aus den Bereichen autonomes Fahren, Robotik und verteilte Systeme. Die Treffen finden quartalsweise statt und verzeichnen im

Durchschnitt rund 50 Teilnehmende. Bis zum Ende der Projektlaufzeit wurden vier Meetups durchgeführt. Inhaltlich dienen die Veranstaltungen dem Austausch zu aktuellen Forschungsergebnissen, Praxisanwendungen und technologischen Herausforderungen autonomer Systeme. Ergebnisse und Erfahrungen aus dem SCC Projekt flossen dabei regelmäßig in Diskussionen ein und unterstützten so den Wissenstransfer sowie die Vernetzung relevanter Akteure.

5 Zusammenfassung

Im Projekt Safety Control Center (SCC) wurde ein Leitstandkonzept zur Überwachung und Unterstützung autonomer Fahrzeuge entwickelt, implementiert und unter realitätsnahen Bedingungen erprobt. Ziel war es, den sicheren Betrieb autonomer Fahrfunktionen durch eine übergeordnete Safety-Ebene zu ergänzen, die Fahrzeugzustände, Sensordaten und Umgebungsinformationen in Echtzeit erfasst, visualisiert und im Bedarfsfall Eingriffe ermöglicht.

Aufbauend auf den Ergebnissen vorangegangener Projekte zum autonomen Fahren konnte ein bestehender Software-Stack weiterverwendet und gezielt erweitert werden. Zentrale Arbeitsschwerpunkte lagen in der Anbindung unterschiedlicher Fahrzeugplattformen, der Definition und Implementierung einheitlicher Kommunikationsschnittstellen zwischen Fahrzeug und Leitstand sowie der Integration von V2X-Daten aus Lichtsignalanlagen.

Ein wesentliches Ergebnis des Projekts ist der erfolgreiche Nachweis, dass die entwickelte Architektur für die Übertragung, Aufbereitung und Darstellung von Fahrzeug- und Perzeptionsdaten über öffentliche 4G- und 5G-Netze geeignet ist. Die durchgeführten Demonstrationen mit verschiedenen Forschungsfahrzeugen zeigten, dass insbesondere 5G die notwendige Performance für eine nahezu verzögerungsfreie Echtzeitüberwachung und perspektivisch auch für weitergehende Teleoperations- und Sicherheitsfunktionen bietet. Damit schafft das Projekt eine wesentliche Basis für zukünftige Entwicklungen und Demonstratoren und trägt nachhaltig zur Weiterentwicklung sicherer autonomer Mobilität bei.