HOCHSCHULE COBURG

Gefördert durch:

Bundesministerium für Digitales und Verkehr

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

5GKC

11

12/30/2024

5GKC: 5G-gestützte autonom fahrende Einzel- oder Flottenfahrzeuge für den Einsatz als öffentliche Verkehrsmittel im ländlichen Raum; Teilvorhaben: Aufbau eines 5G-gestützten Anwendungsprototypen für das automatisierte Fahren insbesondere in den Bereichen Teleoperation mit AR/VR und (erweiterte) Umfeldwahrnehmung - Abschlussbericht

Hochschule Coburg – Förderkennzeichen 165GU102C

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung und Voraussetzungen 2

2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse 3

2.1 TP1: Management 3

2.2 TP2: Algorithmen und Methoden 6

2.2.1 Umgebungsvisualisierung 6

2.2.2 Erweiterte Umfeldwahrnehmung 14

2.3 TP3: Anwendungsintegration 21

2.4 TP4: 5G Testfeld Evaluation 25

2.4.1 Umgebungsvisualisierung 25

2.4.2 Erweiterte Umfeldwahrnehmung 27

2.5 TP5: Verwertung 30

2.5.1 Veröffentlichungen 30

2.5.2 Einfluss auf die Lehre 31

2.5.3 Vorträge bei Veranstaltungen 32

2.5.4 Videobeiträge 32

3 Rechteverwertung 33

3.1 Schutzrechte 33

3.2 Ergebnisse von Seiten Dritter 33

Gefördert durch:

Bundesministerium für Digitales und Verkehr

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

1 Zielsetzung und Voraussetzungen

Das Ziel der 5G-Modellregion Kronach war es, anwendungsspezifische Testumgebungen zur Erforschung und Entwicklung von 5G-Anwendungen für den Bereich **automatisiertes und vernetztes Fahren** für Forschungseinrichtungen und Unternehmen der Region bereitzustellen und eine praktische **Erprobung** der 5G-Technologie in der Innenstadt von Kronach durchzuführen. Dabei wurde auch die Bevölkerung vor Ort informell eingebunden, den Nutzen der 5G-Technologie aufzuzeigen und Vorurteile gegenüber dieser Technologie abzubauen.

Das für die 5G-Modellregion Kronach erarbeitete Konzept diente der Förderung der Forschung, Entwicklung und Erprobung konkreter Anwendungsfälle im Kontext von 5G. Zur Stabilisierung und Attraktivitätssteigerung ländlicher Wirtschaftsräume zeigte das Projekt zudem Möglichkeiten auf, wie durch den Einsatz von 5G innovative Mobilitätslösungen geschaffen werden können. Attraktive ÖPNV-Angebote fördern die Zuwanderung und verhindern damit die weitere Abwanderung mit ihren negativen Folgen wie z.B. Immobilienleerständen.

Die Ziele der 5G-Modellregion Kronach können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Innovative Anwendungen durch Nutzung der 5G-Technologie im Kontext der Mobilität in ländlichen Gebieten voranbringen
2. Praktische Erkenntnisse für den flächendeckenden Ausbau mit 5G für den Einsatz vernetzter Fahrzeuge gewinnen und dieses auch transferieren
3. Zukünftiges Fachpersonal praxisnah an 5G-Campusnetzen ausbilden
4. Anwendungsnahe Forschung und somit Marktreife von 5G-Technologien voranbringen.

Ausgangspunkt des Projekts waren die verschiedenen Kompetenzen der einzelnen Partner. Bei der Hochschule Coburg waren dies vor allem der damals gerade etablierte Masterstudiengang Autonomes Fahren, Expertise mit V2X- und 5G-Technologien sowie die Funktion als Impulsgeber und akademisches Zentrum der Region. Autonom fahrende Shuttles waren zu dieser Zeit in dem laufenden Projekt “Shuttle-Modellregion Oberfranken (SMO)” eingesetzt und sollten bald darauf in Kronach unter realen Bedingungen erprobt werden. Allerdings erfolgten die Vernetzung und der Datenaustausch zunächst noch auf Basis von LTE. Dabei gab es mehrere Problemzonen auf den definierten Streckenabschnitten, wo das 4G LTE-Signal als sehr schlecht zu bewerten war. Damit konnte die Versorgungslage als nicht lückenlos bezeichnet werden.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Die Ergebnisse und Fortschritte der Hochschule Coburg werden anhand der jeweiligen Teilprojekte in den darin erzielten Resultaten kurz beschrieben.

2.1 TP1: Management

Die im Rahmen des Projektes vorgesehenen 5G-Netze im Gewerbegebiet „Hohe Weide“ (in Verantwortung von Valeo) und auf dem Lucas-Cranach-Campus (in Verantwortung der Hochschule Coburg) waren jeweils als lokales Netzwerk (Campusnetz) geplant und werden im Frequenzbereich von 3,7 bis 3,8 GHz betrieben. Dieser Frequenzbereich eignet sich besonders für eine lokale Anwendung, z.B. auf Werksgeländen oder für Forschungsnetze. Der Vorteil einer Campuslösung besteht auch in der Exklusivität der Nutzung der Frequenzen verbunden mit der Möglichkeit, neue Funktionalitäten aus der Standardisierung frühzeitig testen zu können.

Zum Aufbau der beiden Campusnetze mussten folgende Komponenten der Infrastruktur angeschafft werden:

- 5G-Basisstationen (gNodeB), Radioequipment (z.B. Open-RAN kompatibel) und Antennen (Outdoor, ggf. Indoor-Antennen)
- 5G-Kernnetz-Equipment (u.a. zur Datenanbindung der Basisstationen, Handhabung der Handover zwischen Basisstationen, Orchestrierung des Campusnetzes etc.)
- 5G-Endgeräte
- SIM-Karten zur Einbindung der Endgeräte
- Antennenträger und Stahlbau
- SW-Lizenzen und Gebühren für die Dauer der Nutzung
- Serverinfrastruktur

Dazu haben die Partner Fraunhofer IIS, Valeo und Hochschule Coburg technische Anforderungen für die Campusnetzlösung zusammengestellt. Daraus wurde ein Anforderungsdokument erstellt, das als Leistungsverzeichnis für die Vergabe der Hochschule Coburg und analog dazu für die Angebotsabfrage von Valeo diente. Das Anforderungsdokument beinhaltete alle wesentlichen Informationen zu den Einsatzgebieten, den Einsatzbedingungen (Frequenzspektrum, Netzwerkeigenschaften), den Zuschlagskriterien für die Vergabe, den Angebotsleistungen und den technischen Anforderungen (RAN-, MEC-, Core-, sowie allgemeine, nicht funktionale und bereitstellungsspezifische Anforderungen).

Hochschulseitig wurde die Ausschreibung am 09.06.2021 veröffentlicht. Die Ausschreibung endete am 23.07.2021. Insgesamt waren 5 Angebote eingegangen, die allesamt das hinterlegte Projektbudget überschritten. Nach umfangreicher Sichtung der Unterlagen und Punktevergabe nach den Vergabekriterien für Preis, Lieferzeit und Erfüllung der angegebenen Pflichtvorgaben und Optionen gewann die MUGLER AG

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

die Ausschreibung. Der Zuschlag wurde am 30.08.2021 erteilt. Der Projektträger wurde über die Mehrkosten informiert.

Am 27.09.2021 fand die bautechnische Begehung an den geplanten Örtlichkeiten am Kühnlenzhof statt, im Rahmen derer das Gebäude Kühnlenzhof 4 für die Positionierung der Antennen, die Testfläche im Innenhof und der Europa-Parkplatz als Anwendungsgebiet sowie das Carl-Link-Gebäude in der Güterstraße zur Installation der stationären 5G-Komponenten besichtigt wurden. Die bautechnische Begehung diente als Grundlage für die detaillierte Funknetzplanung. Bei der Begehung waren Vertreter des IT-Zentrums der Hochschule, des Kommunalunternehmens als Besitzer der Grundstücke und der Gebäude, des Campusnetz-Projektteams bestehend aus der HS Coburg, Valeo und dem Fraunhofer IIS anwesend sowie die Projektleitung der MUGLER AG. Die Festlegung der Standorte der Antenne ist auf den nachfolgenden Abbildungen dargestellt

Abbildung 1: Standorte der Campusnetz-Antennen in Kronach

Im Anschluss fand zum einen die Funknetzplanung statt, die die zu erreichende Ausleuchtung und Datenraten vorab simuliert, um die gewählten Standorte von ihrer technischen Eignung zu überprüfen. Dabei wurde auch die genaue Ausrichtung der Antennen ermittelt.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

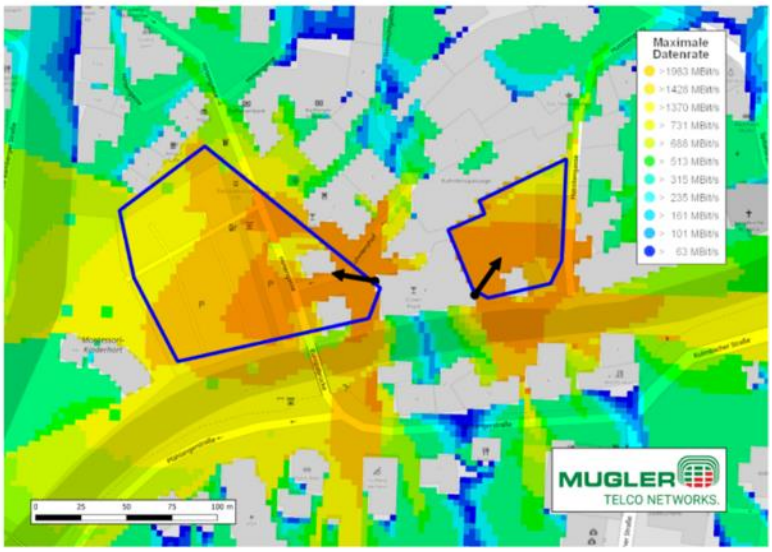

Abbildung 2: Funknetzplanung durch Simulation

Zum anderen musste neben der funktechnischen Bewertung der Standorte auch eine elektrische und IT-Infrastruktur im Dachgeschoss des Kühnlenzhof vorbereitet werden. Dazu war es notwendig, einen Serverschrank für die Base Band Unit, eine neue Stromunterverteilung mit entsprechenden Sicherungen und Schutzeinrichtungen, Dachträger für die Antennen, die datentechnische und stromtechnische Anbindung der Antennen, Dachausstiegsluken zur Installation und Wartung sowie eine 4-fasrige Glasfaserverbindung der beiden Standorte Kühnlenzhof und Güterstraße zu installieren.

Abbildung 3: Installation im Dachgeschoss Kühnlenzhof

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Vorbereitungen wie die Installation der Strom- und Daten-Versorgung des 5G-Campusnetzes fanden zum Teil bereits im Jahr 2021 statt. Die Inbetriebnahme hat sich jedoch auch auf Grund von Lieferverzögerungen der Netzwerkkomponenten auf das Ende des ersten Quartals 2022 verschoben.

Nach der ersten Inbetriebnahme wurden Probleme mit der zugesicherten Performance und den Netzübergängen festgestellt, die in einigen Iterationsschritten, welche deutlich mehr Zeit in Anspruch nahmen als geplant, verbessert oder behoben wurden. Abschließend wurde im ersten Quartal 2023 eine Performance-Messung durch Mugler durchgeführt, bei der Leistungsfähigkeit des Systems ohne Beteiligung der Luftschnittstelle sichergestellt und nachgewiesen werden konnte. Die Performance-Probleme bei der Funkübertragung konnten jedoch nicht endgültig gelöst werden. Damit konnte jedoch die Inbetriebnahme mit einer Verzögerung von 12 Monaten endlich als abgeschlossen und das Campusnetz als betriebsbereit angesehen werden.

2.2 TP2: Algorithmen und Methoden

2.2.1 Umgebungsvisualisierung

Ein Ziel dieses Teilprojekts war es, die Visualisierungen für die Sensordaten und die Umgebung des autonomen Fahrzeugs zu definieren. Dabei wurde Virtual Reality (VR) für die Visualisierung der Sensordatenströme von autonomen Fahrzeugen eingesetzt. Für die Visualisierung wurde eine projektionsbasierte Visualisierungsumgebung (11 Projektoren, 2 PCs mit je 2 NVIDIA RTX 4000) aufgebaut (Abbildung 4).

Abbildung 4: Projektionsbasierte Visualisierungsumgebung

2.2.1.1 Erste prototypische Implementierung

Für die Visualisierung von Sensordaten wurde eine prototypische Implementierung einer VR-Teleoperationsumgebung auf der Basis von CARLA-Simulator und Unreal vorgenommen. Im Rahmen des Projekts wurde zunächst ein Simulator verwendet, da dieser im Vergleich zu einem echten Fahrzeug

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

weniger gefährlich und deutlich kostengünstiger ist. Der CARLA-Simulator ermöglichte die Simulation von mehreren autonomen und manuell gesteuerten Fahrzeugen und kann Sensordaten für diese Fahrzeuge generieren. Live-Videos und Sensordatenströme von Fahrzeugen wurden vom CARLA-Simulator erzeugt und an die Unreal-Engine-Anwendung gesendet. Diese Live-Streaming-Daten wurden dann in der CAVE (projektionsbasierte Visualisierungsumgebung) visualisiert (Abbildung 5).

Abbildung 5: Visualisierung von CARLA im CAVE

Während des Prozesses stellte sich heraus, dass der CARLA-Simulator für die kontinuierliche Erzeugung von Bildströmen mit mehreren Kameras und mehreren Fahrzeugen nicht geeignet ist. Für unseren Anwendungsfall benötigten wir ein virtuelles Fahrzeug mit der Möglichkeit, mehrere RGB-Kameras zu haben, idealerweise drei an der Vorderseite und drei an der Rückseite des Fahrzeugs. Obwohl der CARLA-Simulator Funktionen wie die Teleoperation eines virtuellen Fahrzeugs bietet, wurde diese Hauptanforderung mit den RGB-Kameras von CARLA in Bezug auf die Bildrate nicht erfüllt. Wir testeten mit Computern mit höherer Spezifikation und besseren Grafikkarten, was zu besseren Ergebnissen führte.
Letztendlich entschieden wir uns für einen Computer mit einem Intel Core i9-Prozessor und einer NVIDIA RTX A5000-Grafikkarte für die Ausführung von CARLA. Wir hatten zwei RGB-Kameras mit einer Auflösung von 1280x480 an das virtuelle Fahrzeug angeschlossen, eine für die Vorderseite und die andere für die Rückseite. Damit erreichten wir eine Bildrate von 30 fps für die Fahrsimulation.

Dazu haben wir eine Replikationsstudie zur Fernüberwachung und Teleoperation mit dem bestehenden Setup und die prototypischen Implementierungen für alternative Visualisierungen in der virtuellen Realität (VR) durchgeführt. Im Rahmen des Teilprojekts 2 wurden daher die Vor- und Nachteile der Mensch-Maschine-Schnittstelle in kontrollierten Experimenten mit der nachgebauten Schnittstelle sowie den optimierten Visualisierungen analysiert. In den folgenden Abschnitten werden die Schritte zur weiteren Umsetzung, die durchgeführten Nutzerexperimente und die erzielten Ergebnisse dargestellt.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

2.2.1.2 Verfeinerung der Implementierung

Daraufhin haben wir Verfeinerungen in den Teleoperationsszenarien in CARLA vorgenommen, um die Teleoperationsaufgabe konkreter zu machen und die Aufmerksamkeitsanforderungen in dieser Bedingung zu erhöhen. Wir platzierten grüne Kugeln in der CARLA-Welt, um die Routen für die Navigation in der Aufgabe darzustellen und verwendeten zwei verschiedene CARLA-Städte. Wir platzierten auch Hindernisse in den CARLA-Städten, um realistische Fahrbedingungen zu schaffen.

Abbildung 6: Vordefinierte Pfade in CARLA für die Teleoperation: a) Stadt01 b) Stadt07

Abbildung 7: Beispiel für ein Hindernis in der CARLA-Welt

2.2.1.3 Studie 1: VR-Replikation eines gemeinsamen Überwachungs- und Teleoperationssystems

In der ersten Nutzerstudie untersuchten wir, wie sich der Einsatz einer VR-Version eines realen industriellen Überwachungs- und Steuerungssystems auf dessen Effektivität und Nachteile auswirkt. Darüber hinaus wurde untersucht, welche negativen Auswirkungen es auf die Benutzer hat, wenn sie sich auf zwei mental anspruchsvolle Aufgaben konzentrieren müssen: Überwachung und Teleoperation. Zu diesem Zweck haben wir ein Experiment entwickelt, das einer Go/No-Go-Aufgabe ähnelt, bei der die Teilnehmer auf relevante Alarme reagieren und nicht relevante Alarme ignorieren mussten, und zwar sowohl in einem reinen Überwachungsszenario als auch in einer kombinierten Überwachungs- und Teleoperationsaufgabe.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Versuchsaufbau

- 2x2-Design innerhalb von Probanden
- Unabhängige Variablen:
    - Schnittstelle: VR oder Baseline
    - Szenario: Monitoring oder Teleoperation
- Aufgaben
    - Überwachung: Reagieren auf relevante Events, Ignorieren nicht relevanter Events
    - Teleoperation: Fahren eines virtuellen Fahrzeugs auf einer definierten Route + Überwachung wie in Monitoring
- Abhängige Variablen:
    - Missquote, Reaktionszeit, Fehlerquote
    - Abweichung vom Pfad, zurückgelegte Strecke
    - Benutzerfreundlichkeit, Aufgabenbelastung, Simulatorkrankheit, Anwesenheit

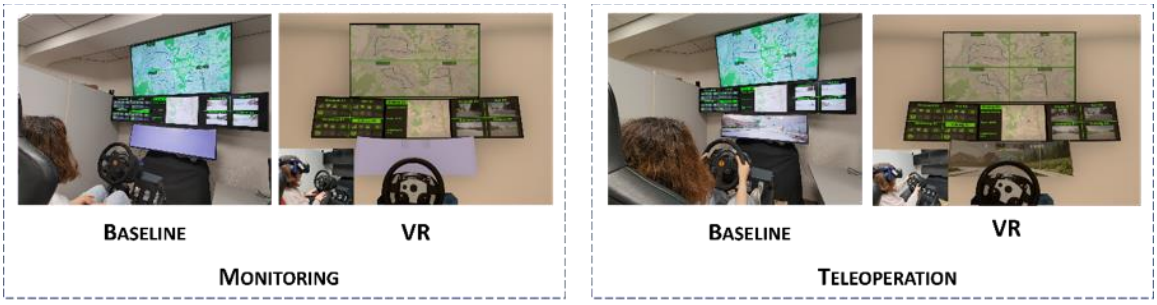

Abbildung 8: Alle Bedingungen der Studie 1

Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigten, dass die Kombination von Teleoperation und Überwachung zu einer verminderten Leistung führte, wobei die Zahl der verpassten Hinweise um 26,7 % zunahm und die Arbeitsbelastung um 24,36 % stieg, was zur Vorsicht vor solchen gleichzeitigen Aufgaben rät. Außerdem führte die Verwendung der VR-Schnittstelle zu einer geringeren Leistung, da 7,6 % mehr Hinweise übersehen wurden als bei der Standardeinstellung. Die Reaktionszeiten waren bei beiden Schnittstellen ähnlich. Bei der Verwendung von VR kam es zu einer um 22,5 % größeren Abweichung vom geplanten Weg, zu einer um 16,5 % höheren Arbeitsbelastung und zu einer um 43,45 % höheren Simulatorkrankheit im Vergleich zur Grundeinstellung.

Diese Ergebnisse weisen auf die Notwendigkeit hin, Überwachungs- und Teleoperationsaufgaben zu trennen, auf mögliche Verbesserungen bei der Schnittstellengestaltung und auf den Bedarf an VR-Headsets mit verbesserten Spezifikationen.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

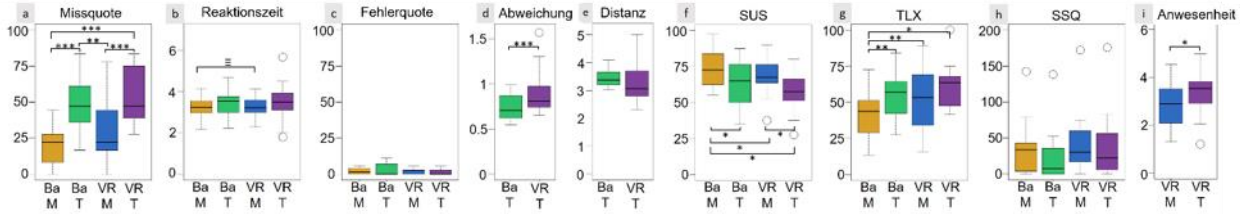

Abbildung 9: Beschreibung der Daten unter Verwendung von Boxplots und Violinplots der abhängigen Variablen, die in Studie 1 analysiert wurden: a) Missquote. b) Reaktionszeit (in s). c) Fehlerquote. d) Abweichung vom Pfad (in m) e) Zurückgelegte Distanz (in km).

2.2.1.4 Studie 2: Bewertung optimierter Layouts für das Monitoring

Aufbauend auf den Ergebnissen von Studie 1 sollten in Studie 2 die Auswirkungen der Verwendung eines prototypischen optimierten Layouts virtueller Bildschirme untersucht werden, die speziell für Überwachungsaufgaben konfiguriert wurden. Wir gestalteten es sowohl für einen physischen 56-Zoll-Bildschirm als auch für sein virtuelles Gegenstück neu und gingen dabei auf die in Studie 1 hervorgehobenen Probleme ein. Die optimierte Schnittstelle zielte darauf ab, Elemente außerhalb des Blickfelds, periphere Unschärfe und Bildschirmabstände, die Ermüdung verursachen und übermäßige Kopfbewegungen erfordern, zu minimieren. Die Teilnehmer an dieser Studie konzentrierten sich daher ausschließlich auf Überwachungsaufgaben. Während es bei physischen Bildschirmen eine Herausforderung ist, das Bildschirmlayout je nach Aufgabe anzupassen, können virtuelle Monitore in der VR je nach Situation leicht umgestaltet werden. Dennoch haben wir ein aufgabenoptimiertes physisches Setup einbezogen, um zwischen den Effekten des Bildschirmlayouts und des Präsentationsmediums (Monitor vs. VR-HMD) zu unterscheiden.

Versuchsaufbau

- 1x3-Design innerhalb von Probanden
- Unabhängige Variablen:
  - Schnittstelle: Baseline, Optimierte physische, optimierte VR
- Aufgabe
  - Reagiere auf relevante Alarme, ignoriere nicht relevante Alarme
- Abhängige Variablen:
  - Missquote, Reaktionszeit, Fehlerquote
  - Benutzerfreundlichkeit, Aufgabenbelastung, Simulatorkrankheit

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

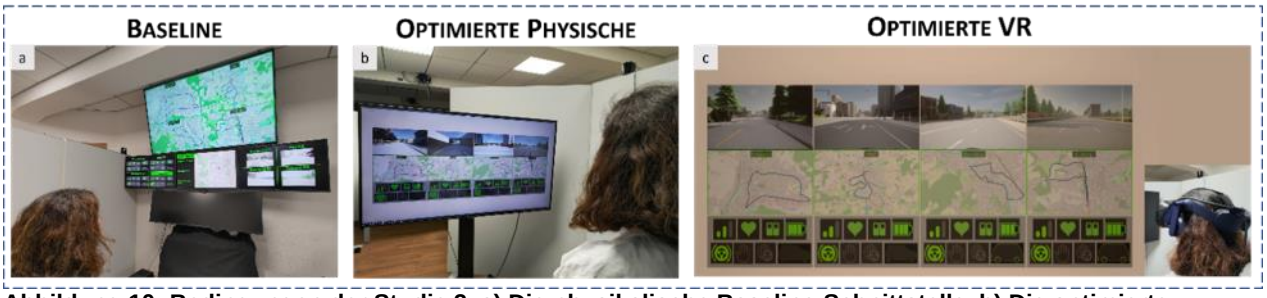

Abbildung 10: Bedingungen der Studie 2. a) Die physikalische Baseline-Schnittstelle. b) Die optimierte physikalische Schnittstelle. c) Die optimierte VR-Schnittstelle.

Ergebnisse

Der optimierte physische Aufbau führte zu einer deutlich geringeren Reaktionszeit, die um 10,4 % niedriger war als bei der optimierten VR-Einrichtung und um 10,4 % niedriger als bei der Basislinie. Darüber hinaus führte sie zu einer signifikant höheren Systembenutzbarkeit, mit einer Steigerung von 14,4 % im Vergleich zur optimierten VR-Einrichtung und einer Steigerung von 11,4 % im Vergleich zur Baseline. Umgekehrt führte die optimierte VR-Einrichtung zu einem signifikant höheren Grad an Simulatorkrankheit, der 57,6 % höher war als bei der optimierten physischen Einrichtung und 60,5 % höher als bei der Basislinie. Es wurden keine signifikanten Auswirkungen der Schnittstelle auf die Fehlerquote, die Fehlerrate und die Aufgabenbelastung festgestellt, und es wurde auch keine Gleichwertigkeit zwischen den Schnittstellenpaaren festgestellt, wenn sie zusammen betrachtet wurden.

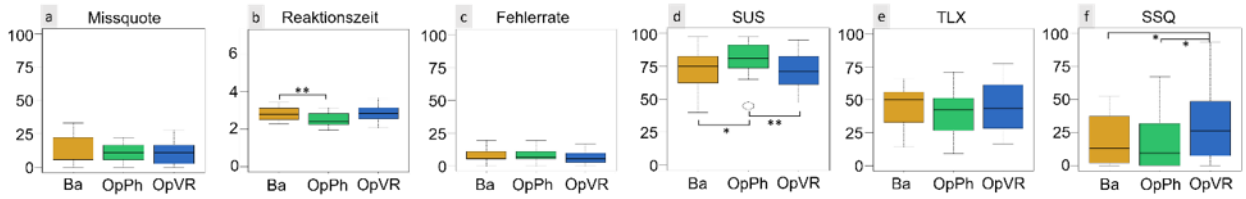

Abbildung 11: Beschreibung der Daten unter Verwendung von Boxplots und Violinplots der in Studie 2 analysierten abhängigen Variablen: a) Missquote. b) Reaktionszeit (in s). c) Fehlerrate. d) System Usability Score. e) NASA Task Load Index. f) Simulatorkrankheit.

2.2.1.5 Studie 3: Bewertung von optimierten Layouts mit einem verbesserten VR-Headset

Von den Teilnehmern an Studie 2 äußerten sich 67 % unzufrieden mit der HTC Vive Pro 2, wobei sie Bedenken hinsichtlich der geringen Auflösung, der peripheren Unschärfe oder des Gewichts äußerten. Daher führten wir eine weitere Nutzerstudie durch, um diese Einschränkungen zu beheben, indem wir die Leistung mit einer Meta Quest Pro bewerteten, die leichter ist und aufgrund ihrer Pancake-Linsen eine schärfere Darstellung bietet. Durch eine empirische Analyse kamen wir zu dem Schluss, dass die Meta Quest Pro die HTC Vive Pro 2 in Bezug auf Faktoren übertraf, die für unseren Anwendungsfall entscheidend waren, nämlich ein geringeres Gewicht für eine längere Nutzung und eine klarere periphere Sicht für die visuelle Überwachung. In dieser Nutzerstudie führten die Teilnehmer die Überwachungsaufgabe also erneut in der optimierten Anordnung durch.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Versuchsaufbau

- 1x3-Design innerhalb von Probanden
- Unabhängige Variablen:
  - Schnittstelle: Physical, VivePro2, QuestPro
- Aufgabe
  - Reagiere auf relevante Alarme, ignoriere nicht relevante Alarme
- Abhängige Variablen:
  - Missquote, Reaktionszeit, Fehlerquote
  - Benutzerfreundlichkeit, Aufgabenbelastung, Simulatorkrankheit, Anwesenheit

Abbildung 12: Bedingungen der Studie 3. a) Die Physical Schnittstelle. b) Die VivePro2-Schnittstelle. c) Die QuestPro-Schnittstelle

Ergebnisse

Der VivePro2 erzielte deutlich niedrigere Werte für die Benutzerfreundlichkeit, 16,5 % weniger als der Physical Aufbau und 12,4 % weniger als das QuestPro. Umgekehrt führte der Physical Aufbau zu einer deutlich geringeren Aufgabenbelastung, die im Vergleich zum VivePro2 um 32,5 % und im Vergleich zum QuestPro um 12,2 % sank. Außerdem führte der Physical Aufbau zu einer signifikant geringeren Simulatorkrankheit, die um 64,5 % niedriger war als beim VivePro2 und um 42,9 % niedriger als beim QuestPro. Das QuestPro zeigte auch eine signifikant geringere Simulatorkrankheit im Vergleich zum VivePro2. Das subjektive Feedback aus dieser Studie deutet darauf hin, dass VR-Headsets der neueren Generation das Potenzial haben, mit aktuellen physischen Displays zu konkurrieren.

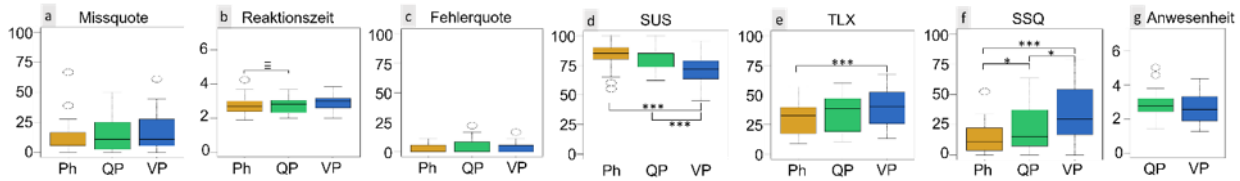

Abbildung 13: Beschreibung der Daten unter Verwendung von Boxplots und Violinplots der in Studie 3 analysierten abhängigen Variablen: a) Missquote. b) Reaktionszeit (in s). c) Fehlerrate. d) System Usability Score. e) NASA Task Load Index. f) Simulatorkrankheit. g) Anwesenheit. Ba=Baseline, OpPh=Optimierte Physik, OpVR=Optimierte VR. (* < 0.001 ** < 0.01 * < 0.05). Die Gleichwertigkeit der Bedingungen ist durch ≡ gekennzeichnet.**

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

2.2.1.6 Abschluss

Unsere Forschung legt nahe, dass der Versuch, physische Schnittstellen in der virtuellen Realität (VR) nachzubilden, aufgrund von Wahrnehmungs- und Ergonomieproblemen zu größeren Kosten führt als zu potenziellen Vorteilen, wie etwa einer verbesserten Konzentration durch Isolation. Darüber hinaus haben wir bei gemeinsamen Teleoperations- und Überwachungsaufgaben unabhängig von der verwendeten Schnittstelle einen Leistungsrückgang von über 25 % gemessen, insbesondere in Bezug auf verpasste Alarme. Daher raten wir dringend davon ab, solche gemeinsamen Aufgaben in Zukunft zu fördern. Wir sind jedoch optimistisch, dass künftige Fortschritte in der Software (z. B. stereoskopisches Sehen, anpassbare Bildschirmlayouts) und Hardware (z. B. leichtere Headsets mit größerem Sichtfeld) die derzeitigen Nachteile der Verwendung von VR für die Überwachung und Teleoperation autonomer Fahrzeuge aufwiegen könnten.

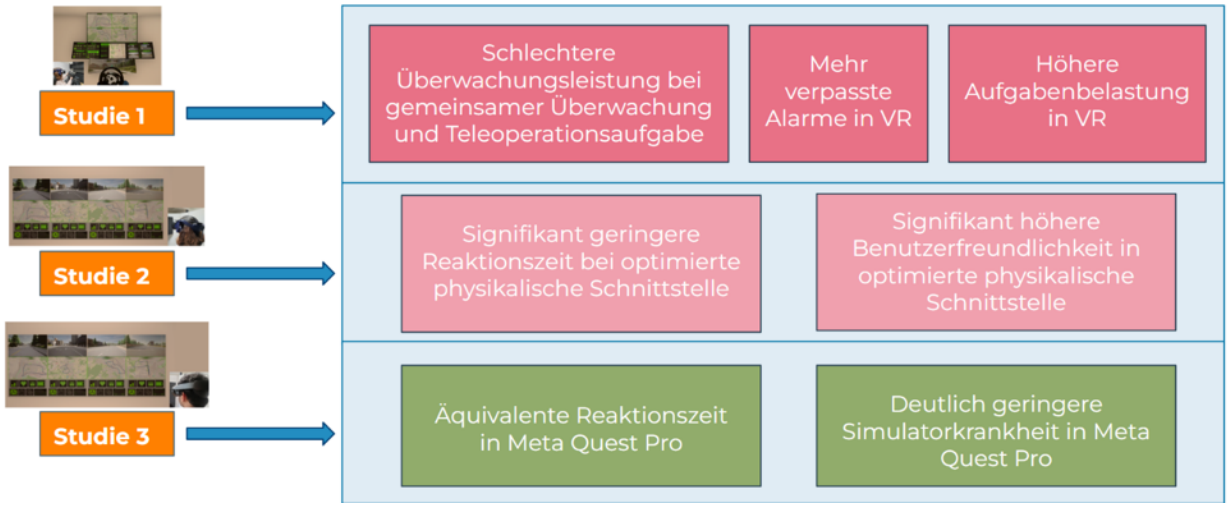

Abbildung 14: Zusammenfassung der Ergebnisse

2.2.1.7 Surround View-Visualisierung

Als Teil unserer Fortschritte in der VR-Teleoperationsumgebung haben wir ein projektives 360°-Texturierungssystem in Unreal Engine entwickelt, um eine vollständig immersive Surround-Ansicht des Fahrzeugs zu liefern. Dieses System verwendet eine Bild-Streaming-Pipeline, um die Kamerabilder von den Surround-View-Kameras des Fahrzeugs direkt an die VR-Anwendung zu übertragen. Die Pipeline basiert auf einem ROS-basierten Framework, bei dem ein ROS-Publisher-Knoten Bilder von den vier Kameras des Fahrzeugs - vorne, hinten, links und rechts - über ihre jeweiligen ROS-Topics streamt. Ein ROS-Subscriber-Knoten fängt diese Streams auf und leitet sie zur Verarbeitung an die Unreal-Engine-Anwendung weiter. Innerhalb der Unreal Engine werden virtuelle Kameras verwendet, um die eingehenden Bilder zu projizieren.

Um eine nahtlose 360°-Visualisierung zu erreichen, werden die gestreamten Bilder mithilfe projektiver Geometrie auf eine sphärische Oberfläche abgebildet. Das Surround-View-Modul

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

verarbeitet diese Fisheye-Bilder und projiziert sie auf die innere Oberfläche einer großen virtuellen Kugel. Dies geschieht mit vier Projektoren, von denen jeder für die Darstellung eines Fisheye-Bildes auf einem bestimmten Abschnitt der Kugel verantwortlich ist. Aufgrund der großen Projektionswinkel überlappen sich die Bilder in bestimmten Bereichen, stimmen jedoch nicht perfekt überein, da Unterschiede in Perspektive und Projektionsgeometrie bestehen. Um dies zu lösen, wird die Projektion jedes Bildes auf einen kleineren Winkel begrenzt, wodurch die Überlappung reduziert und Verzerrungen in den Übergangsbereichen minimiert werden.

Um nahtlose Übergänge zwischen benachbarten Bildern zu gewährleisten, wird die Überblendung dynamisch an den aktuellen Betrachtungswinkel des Nutzers innerhalb der virtuellen Umgebung angepasst. Dies schafft ein zusammenhängendes und immersives Panoramaerlebnis. Ein solches immersives Surround-View-System kann das Teleoperationserlebnis verbessern, indem es dem Bediener ein realistischeres und umfassenderes Bild seiner Umgebung vermittelt und so sein Situationsbewusstsein verbessert.

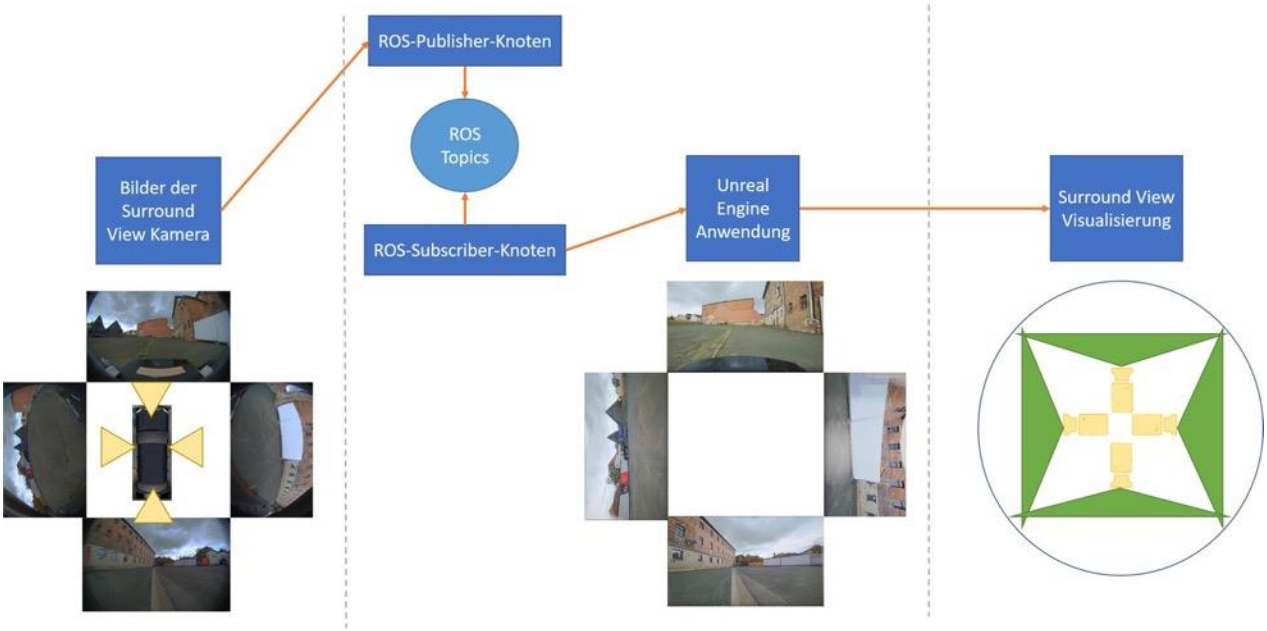

Abbildung : Verarbeitung von Kamerabildern zu einer Surround-Visualisierung

2.2.2 Erweiterte Umfeldwahrnehmung

Ein weiteres Ziel dieses TP war, die Sichtweite eines Fahrzeugs über seine Ego-Sensorik hinaus zu erweitern, da für die fahrzeugeigene Sensorik, durch physikalische Grenzen, im Weg befindliche Objekte oder durch die Perspektive die Sichtweite und damit die Erkennung anderer Verkehrsteilnehmer begrenzt ist. Ein Beispiel hierfür ist eine uneinsichtige Kreuzungssituation, in welcher mit den Ego-Sensoren nicht

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

erkannt wird, welche Verkehrsteilnehmer sich im Kreuzungsbereich befinden (siehe Abbildung 15). Von besonderer Bedeutung sind dabei sog. Vunerable Road User (VRU), also vor allem Fußgänger und Fahrradfahrer.

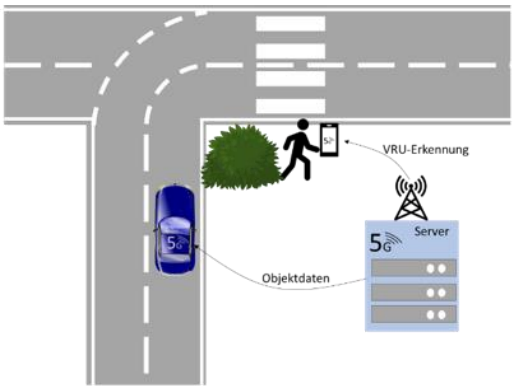

Abbildung 15: Kreuzungssituation mit VRU

Neben dem reinen passiven Aspekt des Datenübermittlers zwischen den Teilnehmern sollte auch die Fähigkeit des 5G-Netzes selbst als aktive Datenquelle untersucht werden. Im 5G-Netz, wie auch in anderen Mobilfunknetzen, fallen bei der Vermittlung Daten über die Netzteilnehmer an. Diese Daten können ggf. für eine Verbesserung der Sicherheit im Straßenverkehr genutzt werden. Vor allem Positionsdaten der Netzteilnehmer sind hierbei von Interesse, welche anonymisiert und sicher an weitere authentifizierte Verkehrsteilnehmer geleitet werden. In diesem Projekt sollte der Fokus auf die grundsätzliche Eignung dieser Daten zur Erweiterung der Umfeldwahrnehmung von autonom fahrenden Fahrzeugen gelegt werden. Konkret sollte dazu das 5G-Campusnetz genutzt werden, um die Position der im Netz befindlichen Mobiltelefone zu erfassen, ggf. zu klassifizieren und an das Fahrzeug weiterzureichen. Damit sollte eine Übersicht der im Straßenverkehr befindlichen VRUs generiert werden. An diesem Prozess wären im Wesentlichen 3 Hauptkomponenten beteiligt, welche im nachfolgenden Schaubild (Abbildung 16) dargestellt sind.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

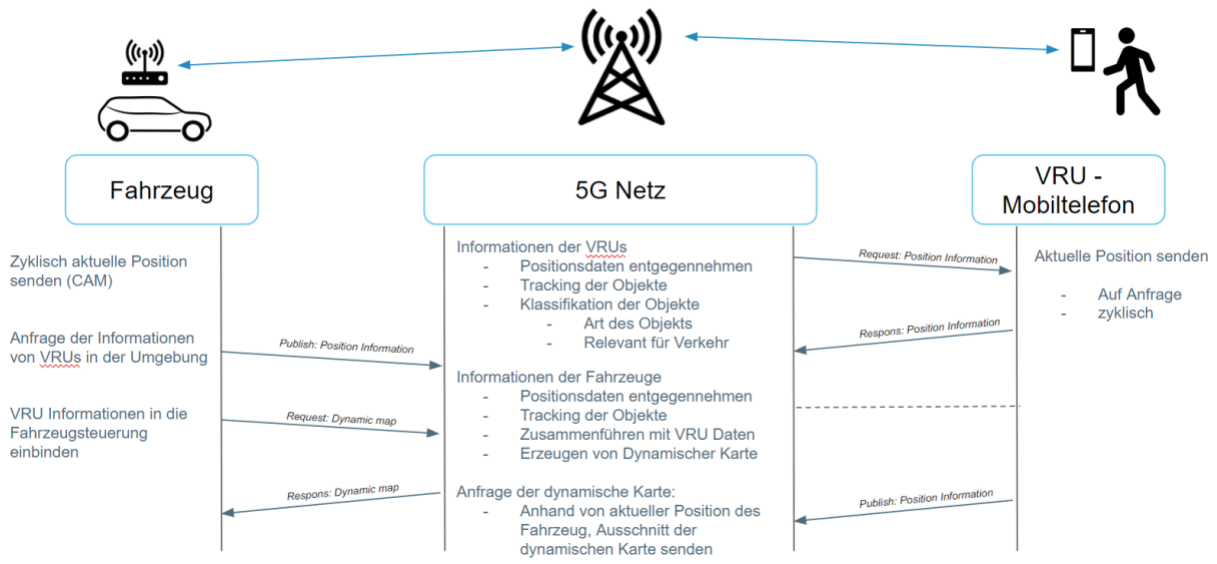

Abbildung 16: Prozess der VRU-Erkennung über ein 5G-Netz

Gemäß 3GPP-Spezifikation Release 16 und 17 könnte das 5G-Netz zwar eine sehr genaue Lokalisierung aller Teilnehmer erreichen. Allerdings wurde diese Funktion von den Herstellern der 5G-Infrastruktur zum Zeitpunkt des Projektstarts nicht implementiert und war auch bis Ende der Projektlaufzeit nicht für Anwendungen im Freien verfügbar. Daher wurde zur Positionsbestimmung anderer Verkehrsteilnehmer, vor allem VRUs wie Fußgänger und Radfahrer, eine Applikation für Smartphones entwickelt, die zyklisch die Positionsinformationen eines Mobilfunkteilnehmers über das MQTT-Protokoll an einen Server meldet.

Als Gegenstelle wurde ein MQTT-Server zum Datenaustauch auf dem Applikationsserver im Campusnetz eingerichtet. Dieser diente als Schnittstelle der beteiligten Kommunikationspartner, wie auf nachfolgendem Bild verdeutlicht ist. Dabei verband er nicht nur das Fahrzeug und die VRUs miteinander, sondern auch die Applikation/en, die die Daten der Verkehrsteilnehmer verarbeiten.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Abbildung 17: Schematischer Aufbau des Datentransfers

Eine der größten Herausforderungen bei der Klassifizierung von Verkehrsteilnehmern mit GNSS-Daten ist der Mangel an qualitativ hochwertigen, frei zugänglichen und vergleichbaren Datensätzen, insbesondere für verletzliche und daher interessante Verkehrsteilnehmerklassen wie Radfahrer und Motorradfahrer. In einem ersten Konzeptnachweis wurden synthetische Daten mit der Open-Source-Simulationssoftware CARLA generiert. Dieser Ansatz wurde jedoch später verworfen, da die simulierten Entitäten streng bestimmten vordefinierten Verteilungen und Verhaltensweisen folgten. Darüber hinaus scheint CARLA nur drei Verkehrsteilnehmerklassen zu simulieren, die durch unterschiedliche Bewegungsmerkmale unterscheidbar sind: Fußgänger, Radfahrer und motorisierte Fahrzeuge (Motorräder, Autos und Lastwagen).

Da echte Verkehrsteilnehmer-Trajektoriendaten schwer zu beschaffen sind, wurde der für diese Arbeit verwendete Datensatz von einer Gruppe von sechs Freiwilligen mit einer mobilen App gesammelt, die an der Hochschule Coburg entwickelt wurde. Insgesamt wurden 165 reale Verkehrsteilnehmer-Trajektorien gesammelt, die eine Dauer von etwa 32 Stunden repräsentieren. Diese umfassen etwa 34,6% der gesammelten Daten PKWs, 24,5% Radfahrer, 20,3% Motorradfahrer und 20,6% Fußgänger. Die Android-App dazu sendet periodisch die aktuelle Position, die aus dem Global Navigation Satellite System (GNSS) ermittelt wird, mittels des Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) Protokolls. Der MQTT-Server stellt diese Daten bereit und eine Cassandra-Datenbank speichert diese Werte ab. Diese Werte können sowohl als aktuelle als auch, falls gewünscht, als historische Werte abgerufen werden.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Abbildung 18: MotionTrace-App

Damit wurde eine Klassifikation von Verkehrsteilnehmern (Fußgänger, Fahrräder, Motorräder, Autos) erstellt. Bewegungsmerkmale werden aus Positionssequenzen abgeleitet und Fehler in den Daten bereinigt. Die Länge der Sequenzen beeinflusst die Klassifikationsqualität. Ein horizontales Rauschen kann durch Überspringen jedes zweiten Aufnahmewerts (nur alle 2s) reduziert werden. Die Sequenzdaten haben einen starken Bias (eng begrenzte Region, kurzer zeitlicher Abstand), so dass keine Basismerkmale als Training für Klassifikation verwendet werden konnten.

Für das Map-Matching mussten die Sequenzdaten vorklassifiziert werden, damit das richtige Verfahren verwendet werden konnte. Diese erfolgt mit einem Random-Forest-Verfahren. Anschließend kann eine Klassifikation der geglätteten Daten mit rekurrenten neuronalen Netzen (RNN) genutzt werden. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass es rückwärtsgerichtete Verbindungen („Gedächtniszellen") besitzt, wodurch zeitlich codierte Muster erkannt werden können. RNNs können mit beliebig langen Sequenzen umgehen, d.h. ein Test kann schon mit einer kleinen Sequenz durchgeführt werden.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

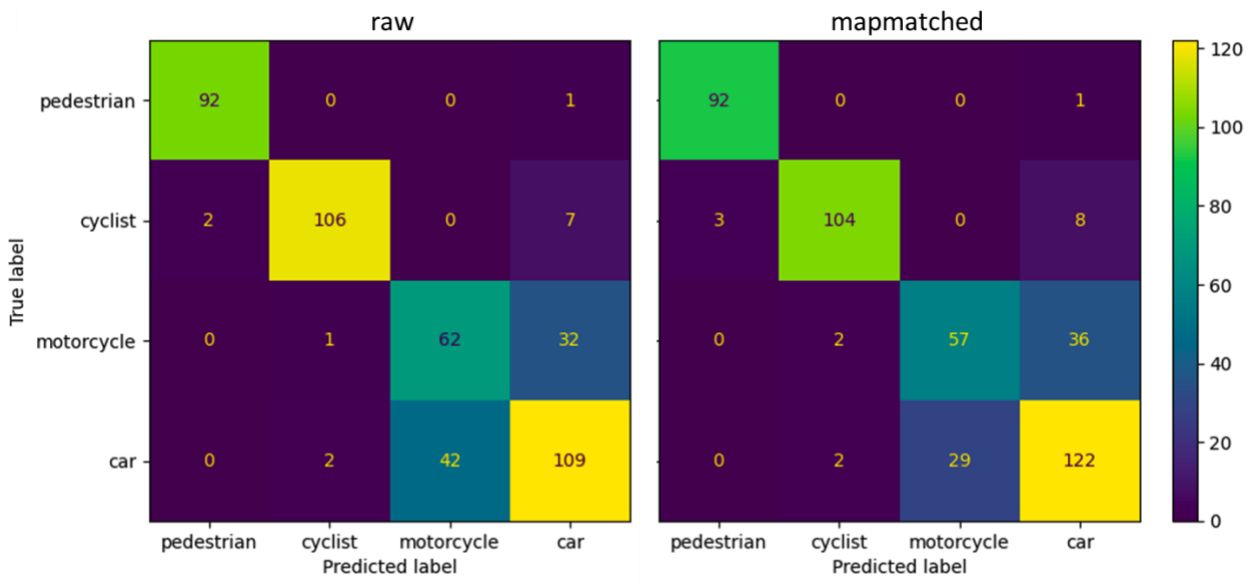

Abbildung 19: Konfusionsmatrizen der Hauptklassifikation mit RNNs über 2s-Sequenzen, ohne und mit Mapmatching

Die Ergebnisse zeigen, dass RNNs Verkehrsteilnehmer gut klassifizieren können, wobei Map-Matching der Sequenzen die Klassifikationsqualität nicht verbessert.

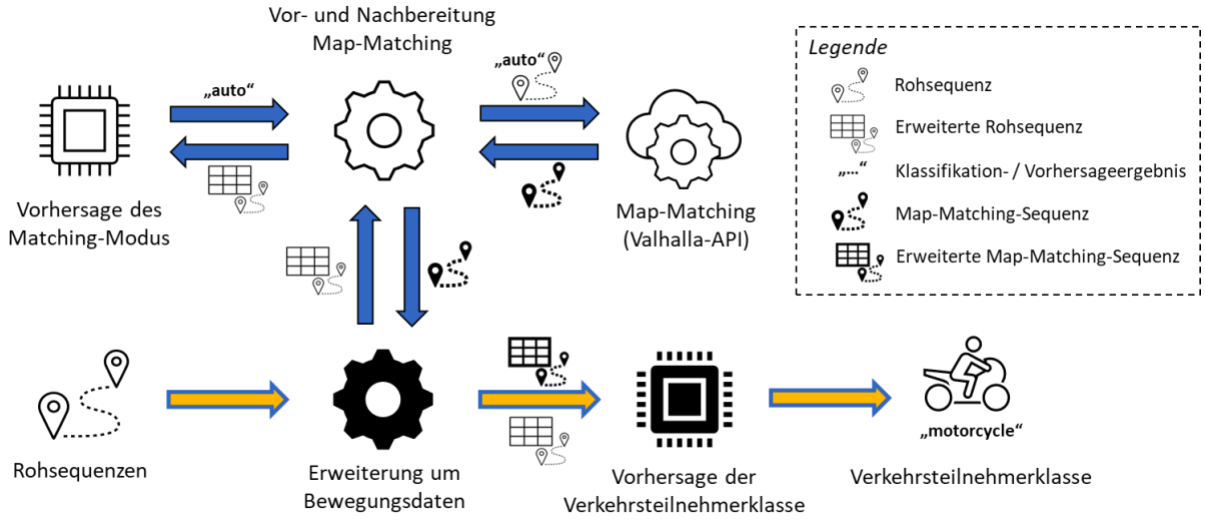

Abbildung 20: Ablauf der Verkehrsteilnehmerklassifizierung

Die gesamte Wirkkette von der Smartphone-App über den MQTT-Server auf dem Applikationsserver im Campusnetz hin zur ROS-Node auf dem Fahrzeug/Leitstand wurden umgesetzt und getestet. Die Daten über die aktuelle Position der Person wurden mittels der App über den MQTT-Server an den CAR-PC geleitet.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

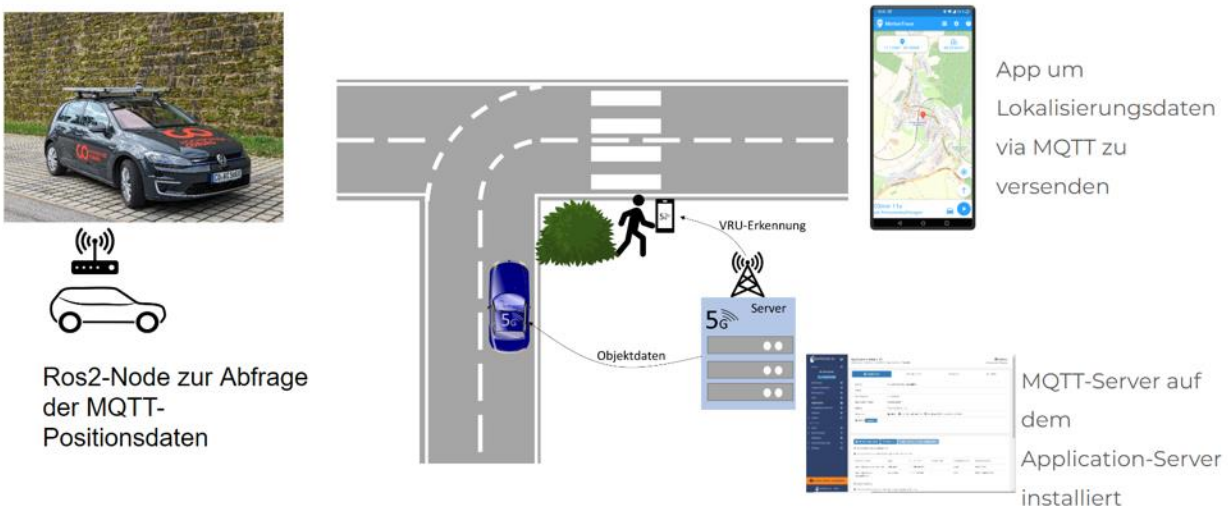

Abbildung 21: Wirkkette für die erweiterte Umfeldwahrnehmung

Einen wichtigen Teil des Projektes waren Implementierungen zur Automatisierung der Fahrzeugbewegungen, dafür wurde, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, ein Fahrzeug mit Sensoren und Schnittstellen ausgestattet und diese in der Softwareplattform integriert. Im nachfolgenden Schaubild (Abbildung 22) sind die verschiedenen Bestandteile der Fahrzeugsteuerung dargestellt, welche im nächsten Schritt implementiert wurden.

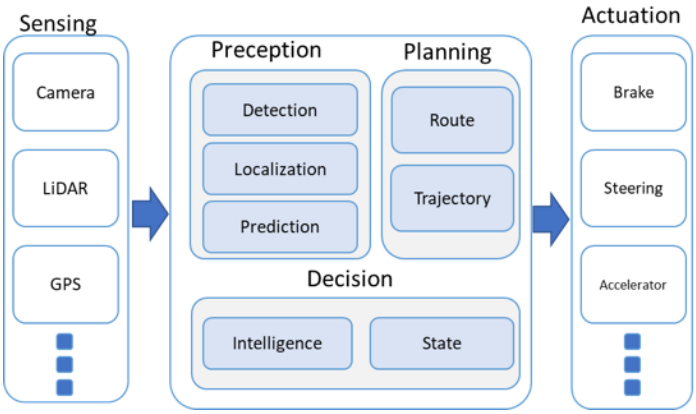

Abbildung 22: Bestandteile der Fahrzeugsteuerung

Auf diese Weise wurde die Integration der Sensoren und als auch der Aktorik des Testfahrzeugs und der Anbauteile umgesetzt. Die zusätzlich angebrachten Sensoren (LiDAR und Kameras) sind alle in ROS2 integriert, so dass deren Daten für die weitere Verarbeitung vorliegen. Des Weiteren ist die Schnittstelle zur Steuerung des Fahrzeugs in die ROS2-Umgebung eingebunden. In dieser Form könnten Daten aus dem Fahrzeug sowohl zur automatischen Steuerung des Fahrzeugs als auch an dem Teleoperator übertragen werden.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Die Qualität der empfangenen Daten hängt sehr stark vom Netzwerk ab. Deswegen haben wir uns neben der Implementierung der Use-Cases haben auch mit einem simulativen Ansatz beschäftigt, der die Effekte einer latenzbehafteten Verbindung in der Verkehrssimulation abbildet. Diese Untersuchungen wurden mit Hilfe des Simulation of Urban Mobility (SUMO) durchgeführt, dabei wurde das Spektrum an verfügbaren Fahrermodellen so erweitert, dass die Netzwerklatenzen wie diese bei einer Teleoperation vorhanden sind, abgebildet werden. Der Ansatz wurde anhand von in der Literatur beschriebenen User-Studien verifiziert.

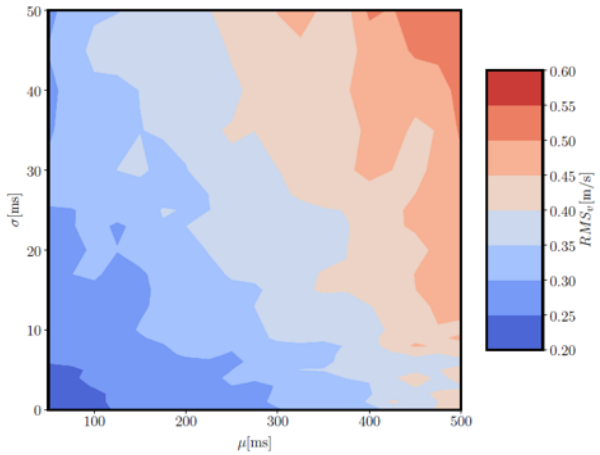

Abbildung 23: Root Mean Square Error bei verschiedenen Latenzen

Er zeigte eine gute qualitative Übereinstimmung mit den Ergebnissen von User-Studien, und bietet damit den Vorteil, den Einfluss von Netzwerkparameter simulativ zu untersuchen ohne aufwendige Studien durchzuführe. Es ist somit besonders hervorzuheben, dass die Effekte einer variablen Latenz und einer konstanten Latenz gut mit der Erweiterung des EIDM-Models modelliert werden konnten. In Abbildung 23 ist die “Güte” des Fahrens in Bezug auf eine konstante Latenz und eine variable Latenz dargestellt. Es zeiget sich, dass sowohl bei steigender konstanter Latenz als auch bei ansteigenden Latenzschwankungen die “Fahrqualität” sink.

2.3 TP3: Anwendungsintegration

Für das Projekt war hochschulseitig u.a. der Aufbau eines autonomfähigen Fahrzeugs vorgesehen, um die beiden Anwendungsfälle Teleoperation mittels AR/VR und erweiterte Umfeldwahrnehmung demonstrieren und die Umsetzbarkeit der Technologien anhand einer Endanwendung evaluieren zu können. Der Projektpartner Valeo verfügt bereits über eine Flotte von verschiedenen entsprechenden Versuchsträgern für unterschiedliche Anwendungsfälle.

Um die Vergleichbarkeit bei der Evaluation der Anwendungsfälle herzustellen, hat die Hochschule Coburg einen ähnlichen Versuchsträger aufgebaut. Voraussetzung hierfür ist die Verwendung eines Fahrzeugs mit einer MQB-B-Plattform, wie sie in diversen Fahrzeugen der Volkswagen AG eingesetzt wird. Dazu wurde ein

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

vollelektrischer VW Golf des Typs e-Golf beschafft, welcher auch optional indoor eingesetzt werden könnte. Dieser lag preislich auch weit unter dem geplanten Budget, wodurch Kosten gespart werden konnten. Der Projektträger wurde über die Änderung informiert. Zusätzlich wurde die Beschaffung eines Testfahrzeugs am 05.05.2021 beim bayerischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst beantragt und genehmigt.

Parallel zur Fahrzeugbeschaffung wurde die öffentliche Ausschreibung zur Umrüstung des besagten Fahrzeugs zum autonomfähigen Versuchsträger vorbereitet. Die Umrüstung beinhaltete u.a.

- den Basisaufbau des Versuchsträgers inkl. Schnittstellen AI / THI / PDI / SI / WHI / Lenkradtasten,
- die Bereitstellung des Customer CAN / des Vehicle Data CAN,
- die Bereitstellung eines Sicherheitskonzepts (z.B. zur Ausfallsicherheit, kontrollierte Übernahme),
- die Bereitstellung des Powermanagement,
- den Abgriff von Area View-Bilddaten,
- den technischen Support,
- die kundenspezifische, bedarfsgerechte Bereitstellung von Fahrzeugparametern und -signalen,
- sowie Optionen.

Die Ausschreibung wurde am 30.07.2021 bekanntgegeben und endete am 30.08.2021. Der geplante Auftragsstart war im 09/21. Auf die Ausschreibung hat sich ein Anbieter beworben, namentlich die Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr, kurz IAV GmbH mit Sitz in Berlin. Das Angebot der IAV GmbH überstieg die Preisindikation nicht, das Budget für den Fahrzeugumbau wurde damit (ohne Auswahl von Optionen) eingehalten.

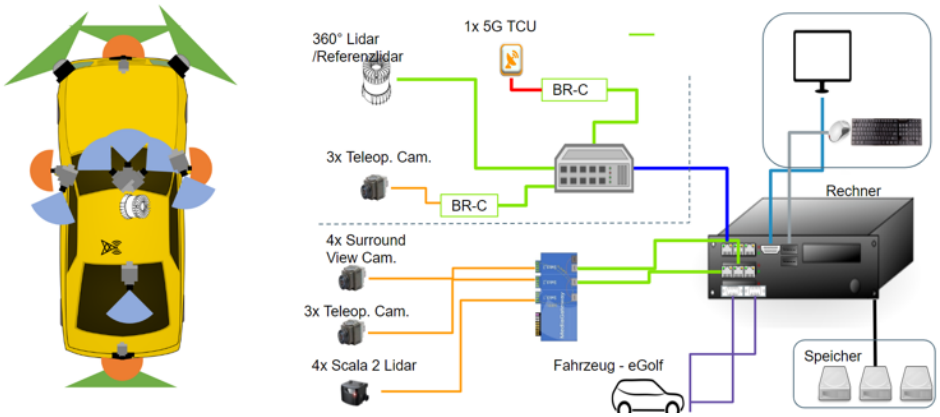

Abbildung 24: Schematischer Aufbau der Fahrzeugsensorik

Dabei sind die Komponenten, welche auf dem Fahrzeugdach angebracht sind, in eine Dachbox integriert, in der sowohl eine weitere kleine Stromversorgung als auch ein Netzwerkswitch eingebaut sind. Der Switch ist mit einer Datenrate von 10 Gb/s an den CAR-PC angebunden. Die Komponenten, welche sich im oder

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

am unteren Teil des Fahrzeugs befinden, werden direkt oder über das Mediagateway an den CAR-PC geführt.

Abbildung 25: Testfahrzeug (ohne montierte Dachbox)

Zudem wurden, wie in 2.2.2 ausgeführt, die Komponenten auch softwaretechnisch angebunden. Dabei wurden die Simulationsszenarien in CARLA vollständig umgesetzt, die Anbindung von CARLA an ROS2 realisiert und ROS-Bibliotheken zu Perception, Lokalisierung und Mapping in Betrieb genommen.

Abbildung 26: Anbindung von CARLA an ROS2

Für den Realbetrieb wurde ein Zustandsmodell entwickelt und realisiert (Abbildung 27).

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

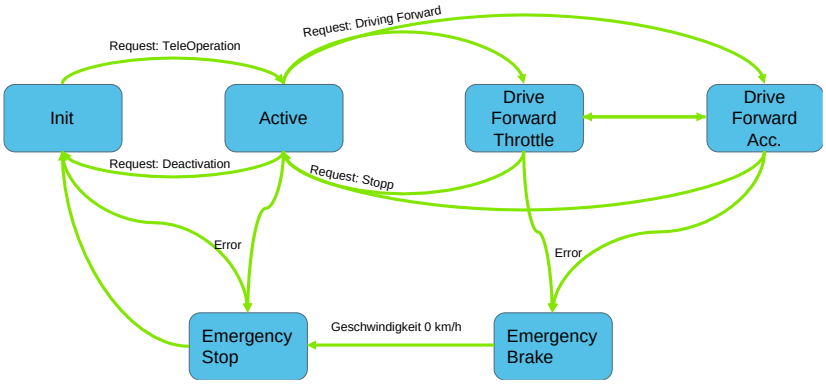

Abbildung 27: Zustandsmodell für die ROS-Operation

Zusätzlich konnte der Software-Stack zum autonomen Fahren auf das Testfahrzeug überführt und getestet werden. Zugrunde liegend wurde der Autoware.Auto auf dem Testfahrzeug integriert und auf die im Fahrzeug verbauten Sensoren und Gegebenheiten angepasst.

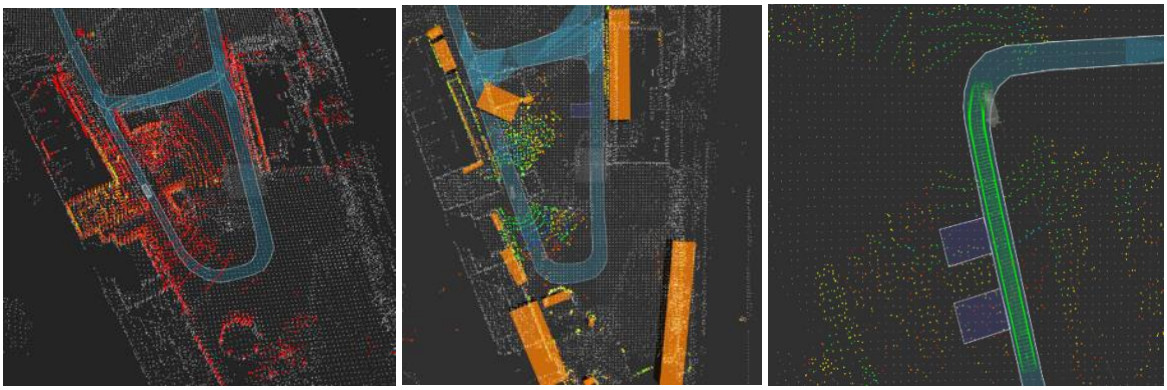

Abbildung 28: Planung des Testfelds

Somit konnten von der Eigenlokalisierung (Bild links), über die Umgebungserkennung (Bild Mitte) bis hin zur Trajektorienplanung (Bild rechts) viele wichtige Bestandteile des Software-Stacks auf das Testfahrzeug angepasst werden.

Neben der Anpassung der verschiedenen Komponenten mussten auch noch weitere Daten in Form von Karten erstellt werden. Dazu wurde eine PCD-Map (Point-Cloud-Data) generiert, die ein dreidimensionales Abbild der Umgebung auf Basis von Lidarpunkten darstellt und vorwiegend zur genauen Positionierung des Fahrzeugs genutzt wird. Daneben wird noch eine Lanelet2-Karte genutzt, welche in etwa eine Repräsentation der Fahrspuren ist und die möglichen Bereiche, in welchen das Auto bewegt werden darf, markiert.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Zu guter Letzt wurde noch ein Fahrzeuginterface implementiert, dass die Ausgangsdaten des Trajektorienreglers in für das Testfahrzeug verständliche Signale übersetzt. Mit dem gesamten Setup wurden Testfahrten auf dem Schützenplatz in Kronach durchgeführt.

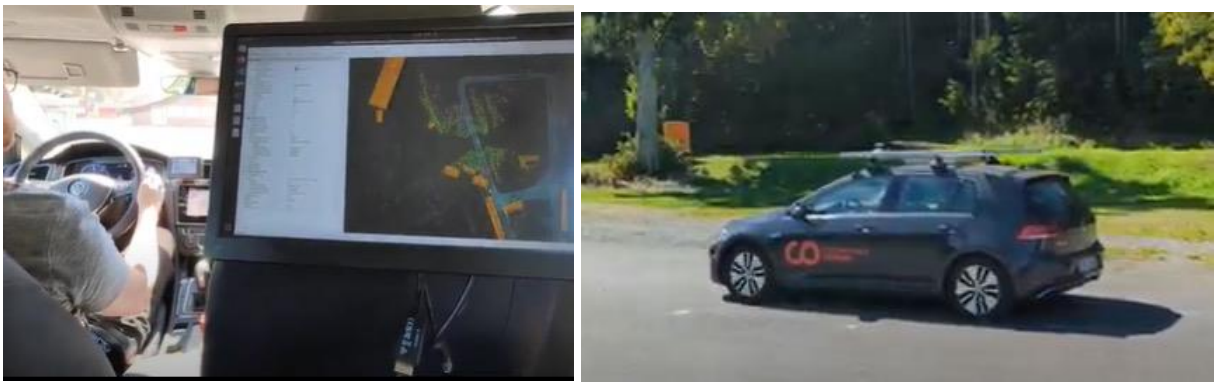

Abbildung 29: Testfahrt des Versuchsfahrzeugs

Die Tests zeigten, dass die Systemauslastung hoch ist und die Datenmenge für die Verarbeitung das System ausreizen. Dennoch konnte das Fahrzeug auf dem Schützenplatz bei niedriger Geschwindikeit kurze Strecken autonom zurücklegen.

2.4 TP4: 5G Testfeld Evaluation

2.4.1 Umgebungsvisualisierung

In dieser Nutzerstudie wollten wir die Auswirkungen der Überwachung und Teleoperation in VR im Vergleich zum bestehenden physischen Setup quantifizieren. Dieser physische Aufbau basierte auf dem Aufbau bei Valeo. Zum Zweck der Benutzerstudie installierten wir die erforderliche Hardware, um den Aufbau so nah wie möglich an den von Valeo heranzuführen. Anschließend entwickelten wir die notwendige Software, um dieses System für die Fernüberwachung und Teleoperation zu betreiben. Anschließend haben wir diesen Aufbau in der Unreal Engine 4.27 für VR so genau wie möglich nachgebildet.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Abbildung 30: Vergleich zwischen dem physischen Aufbau und dem nachgebildeten VR-Aufbau.

Das folgende Bild zeigt den gesamten technischen Aufbau und den Datenfluss zwischen den entwickelten Anwendungen.

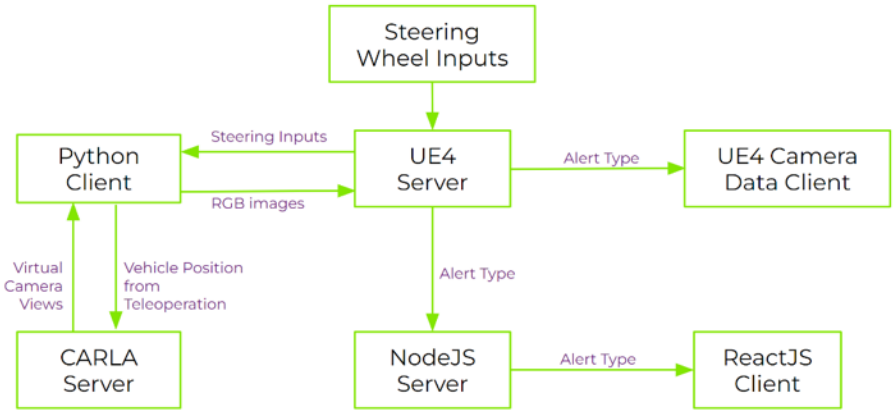

Abbildung 31: Der Datenfluss für die Teleoperation des virtuellen Fahrzeugs.

Studiendesign: Wir planten eine 2x2-Nutzer-Studie mit den unabhängigen Variablen "Interface" und "Szenario". Die Schnittstelle konnte entweder VR oder Baseline (physischer Aufbau) sein. Das Szenario konnte entweder Überwachung oder Teleoperation mit Überwachung sein. Die abhängigen Variablen waren Reaktionszeit, Fehlerquote, Fehlerquote, Systemnutzungsgrad, Aufgabenlastindex und Simulatorkrankheit. Daraus ergäben sich vier Bedingungen: Überwachung in der VR, Überwachung in der Basislinie, Teleoperation in der VR, Teleoperation in der Basislinie.

Aufgaben: Innerhalb eines Zeitraums von 15 Minuten werden in jeder der vier Bedingungen 60 Warnmeldungen angezeigt. Es gibt drei Arten von Warnungen: eine symbolische Veränderung, eine visuelle Veränderung und eine Veränderung der Bewegung. Diese Warnungen können entweder relevant oder nicht relevant sein. Mögliche relevante Warnungen sind Verkehr auf der Route des Fahrzeugs, der durch eine rote

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Kurve angezeigt wird, ein Batteriestand, der auf einen von drei Balken abfällt, und eingefrorene Videoübertragungen von den mittleren Kameras. Nicht relevante Warnungen sind dagegen Verkehr, der sich nicht auf der Route des Fahrzeugs befindet, ein auf zwei Balken sinkender Batteriestand und eingefrorene Videoübertragungen von den Seitenkameras. Die Teilnehmer müssen auf die relevanten Warnungen reagieren und die nicht relevanten Warnungen ignorieren. Die verschiedenen Möglichkeiten der Warnungen sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

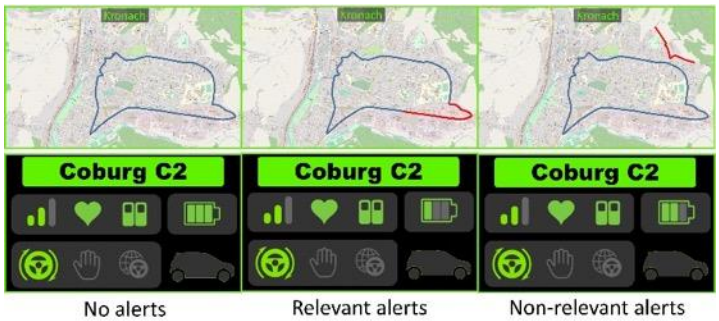

Abbildung 32: Obere Reihe: keine, relevante und nicht relevante Kartenwarnungen. Untere Reihe: kein, relevanter und nicht relevanter Batteriewarnhinweis (Symbol oben rechts).

Für diese Nutzerstudie haben wir vorgefertigte Bilder für das Kontrollzentrum mit relevanten und nicht relevanten Karten- und Batteriewarnungen verwendet. Für die Kameraeinspeisung zeichneten wir einen 15-minütigen Bildstrom von sechs virtuellen Kameras auf, die an einem virtuellen Autopilot-Fahrzeug in CARLA angebracht waren. Um die Teleoperation zu simulieren, haben wir Kamerabilder von zwei virtuellen Kameras, die auf dem virtuellen CARLA-Fahrzeug angebracht waren, live gestreamt.

Trainingsszenarien: Wir bereiteten kurze Trainingsszenarien für die Teilnehmer vor, damit sie sich vor der eigentlichen Aufgabe in der Benutzerstudie mit den Aufgaben vertraut machen konnten.

2.4.2 Erweiterte Umfeldwahrnehmung

Mit den in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Werkzeugen wurden verschiedene Messkampagnen im Realverkehr durchgeführt, wobei Bewegungsdaten von Autos, Fahrradfahrern und Fußgängern erfasst wurden. Diese Daten wurden gesammelt und mit verschiedenen Verfahren des maschinellen Lernens ausgewertet. Zunächst wurde dabei ein k-Means-Clustering bezüglich der Relativgeschwindigkeiten und Abstände der einzelnen Objekte durchgeführt (siehe Abbildung 33). Dabei zeigte sich ein Zerfall in vier Cluster, die folgendermaßen beschrieben werden können:

- Cluster 0: Niedriger Abstand und niedrige relative Geschwindigkeiten. Häufig zu finden in Städten und an Ampeln.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

- Cluster 1: Das Cluster mit der höchsten Wahrscheinlichkeit für Gefahrensituationen. Hohe Geschwindigkeit bei geringem Abstand sorgen für ein besonders hohes Risiko. Auch bei einer Vollbremsung kann der Zusammenstoß nicht gänzlich vermieden werden.
- Cluster 2: Leicht erhöhter Abstand und Geschwindigkeit im Vergleich zu Cluster 0. Häufig zu finden in Städten, insofern sich der Verkehr nicht im Stop & Go befindet.
- Cluster 3: Dieses Cluster stellt eine harmlosere Variante zu Cluster 1 dar. Die Geschwindigkeiten sind noch immer hoch, die Abstände sind im Vergleich jedoch auch größer.

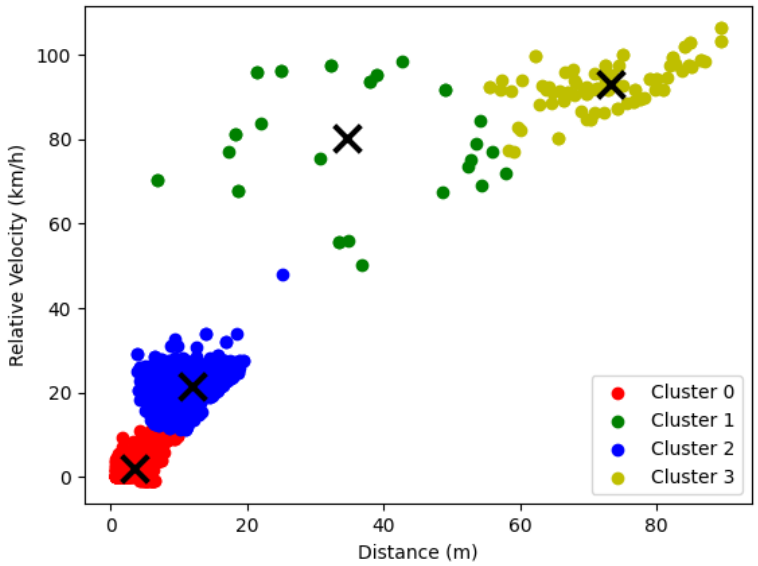

Abbildung 33: Clustering in Risiko-Klassen

Zum Vergleich mit den Messwerten aus dem Realverkehr wurden auch umfangreiche Daten mittels des Verkehrssimulators CARLA erhoben. Bei diesen zeigte sich, dass ein neuronales Feed-Forward-Netz die Art der Teilnehmer bereits sehr gut klassifizieren kann (Gesamtpräzision 93%, Abbildung 34).

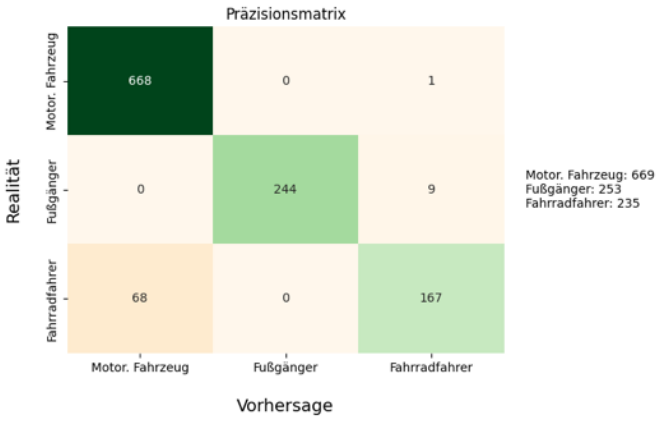

Abbildung 34: Präzisionsmatrix der Verkehrsteilnehmerklassifikation mit simulierten Validierungsdaten auf simulativ trainiertem neuronalem Netz

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Erfreulicherweise konnte diese Präzision auch bei der Übertragung dieses Ansatzes auf Daten aus dem Realverkehr aufrechterhalten werden (Abbildung 35).

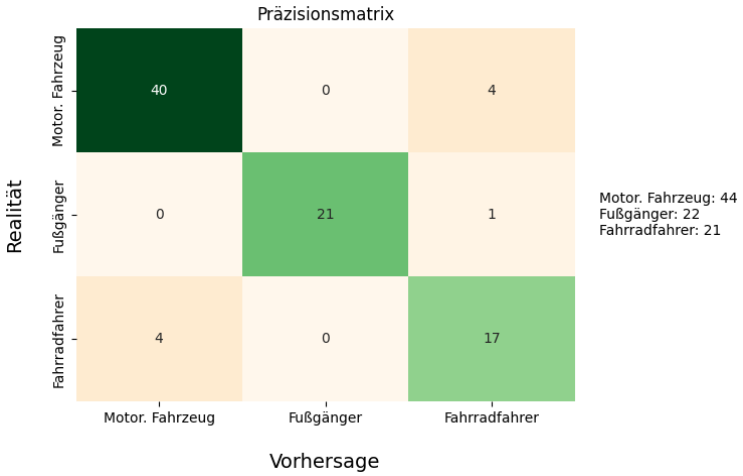

Abbildung 35: Präzisionsmatrix der Verkehrsteilnehmerklassifikation mit realen Validierungsdaten auf real trainiertem neuronalem Netz

Auf den Realdaten wurde auch eine Geschwindigkeitsprognose entwickelt, die ebenfalls sehr vielversprechende Genauigkeiten zeigt (Abbildung 36).

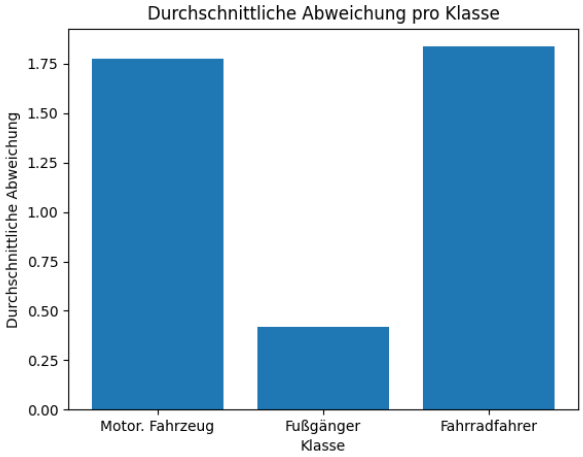

Abbildung 36: Geschwindigkeitsprognose, durchschnittliche Abweichung pro Klasse

Zur Implementierung der weiteren Use-Cases wurde zunächst die Netzwerkverbindung zwischen dem Leitstand und dem Fahrzeug eingerichtet. Dazu wurde ein lokales VPN-Netzwerk zwischen den beiden Systemen via Wiregard aufgebaut. Dies war notwendig, damit die beiden zugrundeliegenden ROS-Umgebungen direkt miteinander kommunizieren können und der Datenaustausch möglichst effektiv stattfindet.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

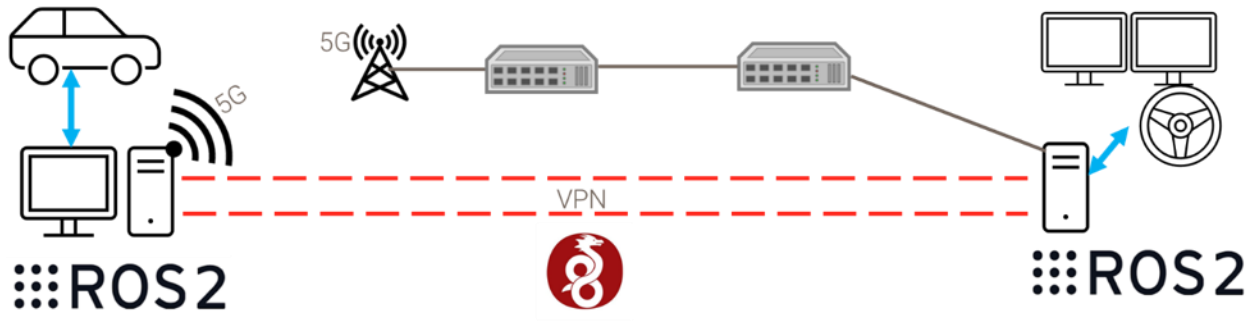

Abbildung 37: Kommunikationsschema

Zudem musste die Videoübertragung optimiert werden, da die Datenmenge der Bildrohdaten die Kapazität der Netzwerkverbindung deutlich überschritt. Es wurde das FFMPEG-Paket mit einer H264-codierung auf der GPU des Fahrzeug-PCs in der ROS2 Umgebung genutzt. Damit hat sich die Datenrate im Vergleich zu den Rohdaten, deutlich reduziert, was die Übertragung der Videostreams ermöglichte.

Abbildung 38: Teleoperation aus dem Leitstand

All diese und weitere kleine Maßnahmen und Verbesserungen ermöglichten, dass das Fahrzeug vom Leitstand im Labor auf dem Testgelände gesteuert und sicher bewegt werden konnte.

2.5 TP5: Verwertung

2.5.1 Veröffentlichungen

Wir haben unsere Forschungsarbeit über die durchgeführten Experimente im Konferenzband des IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR) 2023 unter dem Titel *„Remote*

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Monitoring and Teleoperation of Autonomous Vehicles—Is Virtual Reality an Option?" veröffentlicht und auf der Konferenz in Sydney, Australien, vorgestellt.

Kalamkar, S., Biener, V., Beck, F., and Grubert, J. (2023, October). „Remote Monitoring and Teleoperation of Autonomous Vehicles—Is Virtual Reality an Option?", In *2023 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)* (pp. 463-472). IEEE.

S. Kalamkar, V. Biener and J. Grubert, "VR for Remote Monitoring of Automated Vehicles: Replications Across Follow-Up Evaluations", *2023 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*, Sydney, Australia, 2023, pp. 3-4, doi: 10.1109/ISMAR-Adjunct60411.2023.00008.

Auch die Ergebnisse aus dem Teilprojekt Erweiterte Umfeldwahrnehmung konnten veröffentlicht werden. Dieser Artikel ist zum Zeitpunkt der Berichtserstellung allerdings noch nicht erschienen: L. Köpper and T. Wieland, „Road User Classification from High-Frequency GNSS Data Using Distributed Edge Intelligence", In *IEEE Internet of Things Journal*, 2025 (to appear).

Die Untersuchungen zur Übertragungslatenz konnten dagegen im Konferenzband der IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems veröffentlicht werden: C. Brueckner, L. Patino-Studencki, T. Nan, A. Bueyuekoglu, T. Heyn and M. Fischer, "Simulation of Communication Network Latency Effects on Vehicle Teleoperation", 2023 *IEEE 26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Bilbao, Spain, 2023, pp. 1733-1740, doi: 10.1109/ITSC57777.2023.10422699 und auf der Konferenz in Bilbao präsentiert werden.

2.5.2 Einfluss auf die Lehre

Darüber hinaus sind einige studentische Abschlussarbeiten aus diesem Projekt hervorgegangen:

- M. Sohl: „Klassifizierung der Bewegungsmuster von Mobilfunkteilnehmern zur erweiterten Umfeldwahrnehmung autonomer Fahrzeuge", Bachelorarbeit, Hochschule Coburg, 2022
- R. Torlak: „Detektion der Bewegung von Verkehrsteilnehmern aus Positionsdaten", Bachelorarbeit, Hochschule Coburg, 2022
- P. Opitz: „Klassifizierung der Relevanz von Verkehrsteilnehmern zur Erweiterten Umfeldwahrnehmung Autonomer Fahrzeuge", Bachelorarbeit, Hochschule Coburg, 2022
- C. Hämmerlein: "Aufbau einer Softwareumgebung zur Implementierung und Validierung automatisierter Fahrfunktionen auf einem Versuchsträger", Masterarbeit, Hochschule Coburg 2023
- D. Fischer: „Verwendung von Positionsdaten zur automatisierten Klassifizierung von Verkehrsteilnehmern mittels maschineller Lernverfahren", Masterarbeit, Hochschule Coburg, 2023

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

- L. Köpper: „Klassifikation von Verkehrsteilnehmern auf Basis realer Positionssequenzen mit Verfahren des maschinellen Lernens“, Bachelorarbeit, Hochschule Coburg, 2023
- R. Groß: „Entwicklung einer skalierbaren Echtzeitanwendung zur Umfeldwahrnehmung und Klassifizierung vernetzter Verkehrsteilnehmer mittels maschinellen Lernens“, Bachelorarbeit, Hochschule Coburg, 2024

Des Weiteren sind die Erkenntnisse und Erfahrungen aus diesem Projekt in eine Reihe von Lehrveranstaltungen eingeflossen, vor allem in den Studiengängen Autonomous Driving (M.Eng.), Data Science (M. Sc.), Informatik (B.Sc und M.Sc.) sowie Automobiltechnologie (B.Eng.).

2.5.3 Vorträge bei Veranstaltungen

Die Ergebnisse wurden bei verschiedenen Veranstaltungen vorgestellt:

- 07/2022: Industriegespräch 5G-Technologie, IZK/Hochschule Coburg, Kronach
- 07/2022: Vortrag „*5GKC – Anwendungsnahe Forschung zum autonomen Fahren im 5G Testfeld Kronach*“, 5G-Werkstattgespräch, Wayra 5G Tech Lab, München
- 09/2022: Vortrag „*5GKC – Anwendungsnahe Forschung zum autonomen Fahren im 5G Testfeld Kronach*“, CIC-Thementag zum Thema „5G und seine Auswirkungen“, BAMF, Berlin
- 09/2023: Vortrag "*Simulation of Communication Network Latency Effects on Vehicle Teleoperation*", IEEE 26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Bilbao, Spanien
- 10/2023: Vortrag *”Remote Monitoring and Teleoperation of Autonomous Vehicles — Is Virtual Reality an Option?“,* IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR) 2023, Sydney, Australien
- 10/2023: Vortrag “*VR for Remote Monitoring of Automated Vehicles: Replications Across Follow-Up Evaluations*”, IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct), Sydney, Australien
- 06/2024: Abschlussevent des Projekts 5G-KC, Kronach

2.5.4 Videobeiträge

- Die Initiative „Deutschland spricht über 5G“, die vom 5x5G-Projektträger und der Bundesregierung gefördert wird, hat im April 2024 einen Videobeitrag über dieses Projekt mit dem Titel „*Das ferngesteuerte 5G-Auto*“ produziert und in sozialen Netzwerken veröffentlicht. Es ist u.a. verfügbar über https://youtu.be/R1HOUpA_1JQ?si=Dduq5HeLf4d60bdo.
- Das internetbasierte Lokalfernsehen iTV-Coburg hat im Juni 2024 einen Beitrag zum Projekt unter dem Titel „*Meilenstein im autonomen Fahren*“ veröffentlicht, verfügbar u.a. unter https://youtu.be/ZR0gxgLBQD0?si=n3zeUyBVfkdgqJ7K

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

3 Rechteverwertung

3.1 Schutzrechte

Im Projektzeitraum wurden keine Schutzrechtsanmeldungen durchgeführt.

3.2 Ergebnisse von Seiten Dritter

Es sind keine Ergebnisse von seitens Dritter bekannt geworden, die der Durchführung des Vorhabens widersprechen oder die Zielerreichung gefährden.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

HOCHSCHULE COBURG

Gefördert durch:

Bundesministerium für Digitales und Verkehr

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Kurzbericht zum Vorhaben

5GKC: 5G-gestützte autonom fahrende Einzel- oder Flottenfahrzeuge für den Einsatz als öffentliche Verkehrsmittel im ländlichen Raum; Teilvorhaben: Aufbau eines 5G-gestützten Anwendungsprototypen für das automatisierte Fahren insbesondere in den Bereichen Teleoperation mit AR/VR und (erweiterte) Umfeldwahrnehmung
Förderkennzeichen 165GU102C

1 Aufgabenstellung

Das Projekt „5G-gestützte autonom fahrende Fahrzeuge“ erforschte 5G-Technologien für automatisiertes Fahren, speziell in ländlichen Regionen. Ziel war der Aufbau eines 5G-Campusnetzes in Kronach zur Erprobung innovativer Anwendungsfälle wie Teleoperation mit AR/VR und erweiterter Umfeldwahrnehmung. Es wurden sowohl Hardware-Komponenten wie Basisstationen und Antennen als auch softwaretechnische Lösungen entwickelt. Das Projekt förderte die Forschung, Entwicklung und Marktreife 5G-basierter Technologien und sollte durch moderne Mobilitätslösungen die Attraktivität ländlicher Räume steigern. Gleichzeitig wurden Praxiserfahrungen für Fachpersonal gesammelt und die Bevölkerung einbezogen, um den Nutzen der Technologie aufzuzeigen und Vorurteile abzubauen.

2 Planung und Ablauf

Das Vorhaben wurde in Phasen umgesetzt, beginnend mit der Planung eines 5G-Campusnetzes und der Beschaffung von Infrastruktur. Die Standortplanung in Kronach umfasste Begehungen und Netzsimulationen. Nach Installation der Netzwerktechnik folgten Tests und Anpassungen. Autonome Fahrzeuge wurden ausgestattet, und Software für Teleoperation sowie Umfeldwahrnehmung implementiert. Regelmäßige Abstimmungen mit den Verbundpartnern sicherten Qualität. Öffentlichkeitsarbeit förderte Akzeptanz und Wissenstransfer. Ergebnisse wurden evaluiert und in wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht.

3 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Das Vorhaben baute auf etablierten 5G-Technologien und Standards gemäß 3GPP-Release 16 und 17 auf. 5G-Campusnetze wurden als Grundlage für lokale, exklusive Anwendungen genutzt, um frühe Tests neuer Funktionalitäten zu ermöglichen. Bestehende Technologien, wie Open-RAN-kompatible Basisstationen und das MQTT-Protokoll für Datenaustausch, wurden weiterentwickelt und in die Systemarchitektur integriert.

Es wurden keine spezifischen Schutzrechte genutzt, jedoch basierte die Forschung auf Open-Source-Technologien wie ROS2 und bestehenden Verfahren zur Verkehrssimulation und

Sensorintegration. Durch die Kombination dieser Technologien und Methoden wurde der Stand der Technik für 5G-gestützte autonome Systeme weiterentwickelt und erweitert.

4 Wesentliche Ergebnisse des Projekts

Das Projekt errichtete ein 5G-Campusnetz in Kronach, das als lokale, exklusive Testumgebung diente. Die Netzwerkinfrastruktur umfasste Basisstationen, Antennen und ein Kernnetz, betrieben im Frequenzbereich von 3,7–3,8 GHz. Durch Simulationen und Standortoptimierungen wurde eine stabile Netzabdeckung erzielt.

Weiterhin entwickelte das Projekt eine projektionsbasierte Visualisierungsumgebung, die Sensordaten autonomer Fahrzeuge in einer immersiven 3D-Umgebung darstellt. Mit der Unreal Engine und dem CARLA-Simulator wurden VR-Teleoperationsszenarien getestet. Studien zeigten, dass VR-Schnittstellen im Vergleich zu physischen Setups höhere Simulatorkrankheit und Belastung verursachten, jedoch potenziell anpassbar sind.

Eine Studie verglich Überwachungs- und Teleoperationsaufgaben in VR und physischen Setups. Ergebnisse wiesen auf Leistungseinbußen bei kombinierten Aufgaben hin. Eine weitere Studie untersuchte optimierte Layouts, wobei physische Setups effizienter waren. Eine dritte Studie mit moderneren VR-Headsets wie Meta Quest Pro zeigte Verbesserungen, jedoch weiterhin Nachteile gegenüber physischen Lösungen.

Das Projekt entwickelte zudem ein System zur Erkennung von Verkehrsteilnehmern über 5G-Netze und Smartphones. Eine speziell entwickelte App übermittelte GNSS-Daten via MQTT-Protokoll an einen Server, der diese klassifizierte. Mithilfe von maschinellen Lernverfahren wie Random Forest und rekurrenten neuronalen Netzen wurden Verkehrsteilnehmer (z. B. Fußgänger, Radfahrer) präzise identifiziert. Tests zeigten eine hohe Klassifikationsgenauigkeit, unterstützt durch Map-Matching und Datenbereinigung.

Im Projekt wurde ein autonomes Testfahrzeug auf Basis eines VW e-Golfs entwickelt und erfolgreich integriert. Das Fahrzeug wurde mit Sensorik wie LiDAR, RGB-Kameras und einem CAR-PC ausgestattet, der mit einer ROS2-Umgebung kommuniziert. Funktionen wie Eigenlokalisierung, Trajektorienplanung und Umgebungserkennung wurden umgesetzt.

Ein Software-Stack auf Basis von Autoware.Auto ermöglichte die Automatisierung von Fahrmanövern. Tests im realen Umfeld zeigten eine zuverlässige, jedoch systemauslastungsabhängige Performance bei niedrigen Geschwindigkeiten. Ergänzend wurden PCD- und Lanelet2-Karten erstellt, um präzise Navigations- und Steuerungsdaten zu liefern. Das Fahrzeug demonstrierte die Machbarkeit autonomer Fahrtechnologien in einem 5G-basierten Szenario.