

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title VanAssist – Interaktives, intelligentes System für autonome fernüberwachte Kleintransporter in der Paketlogistik (Overall final report)	
4. author(s) (family name, first name(s)) Seber, Gerd (Project Manager) Czerwionka, Paul Hegerhorst, Torben Schappacher, Manuel Schumann, Detlef Stürmer, Thorsten von Bergner, Alexander Wilken, Nils Zhang, Meng	5. end of project June 2021
	6. publication date 30.06.2021
	7. form of publication Document
8. performing organization(s) (name, address) Bridging IT GmbH DPD Deutschland GmbH Hochschule Offenburg, Institut für verlässliche Embedded Systems und Kommunikationselektronik (ivESK) IAV GmbH Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr Ibeo Automotive Systems GmbH Technische Universität Braunschweig, Institut für Fahrzeugtechnik (IfF) Technische Universität Clausthal, Institut für Software and Systems Engineering Universität Mannheim, Institut für Enterprise Systeme (InES)	9. originator's report no.
	10. reference no. 16AVF2139
	11. no. of pages 86
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) 11030 Berlin	13. no. of references 21
	14. no. of tables 0
	15. no. of figures 55
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) Projekträger VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, Steinplatz 1, 10623 Berlin 30 June 2021	

18. abstract

In order to deal with the high and steadily increasing volume of parcel deliveries, a high degree of automation in parcel sorting process is required. However, for the actual parcel delivery - especially the so-called last mile delivery - there are still great potentials to increase logistic efficiency which is highly relevant due to increasingly stricter requirements under the background like larger parcel volumes and increasing urbanization.

Automated driving (SAE levels 4 and 5) in conjunction with electrically driven vehicles (low noise, zero emissions, suitability for journeys with many starts and stops) offers an interesting approach to address this topic.

The main objective of the associated project VanAssist is to develop an integrated vehicle and system technology that enables largely emission-free and automated delivery of goods in urban areas.

Thereby, the main focus was on following subjects:

- Increasing the efficiency of parcel delivery by minimizing and automating redundant process steps.
- Relief for delivery staff through an intelligent automated vehicle system.

The method of solution follows an intelligent assistance for parcel delivery through automated driving functions of electrically driven mobile vehicles. The test vehicle was created as a prototype based on a so-called Motionboard. Equipped with sensors, vehicle computers, setup and user interfaces, the vehicle was enabled to realize a fully autonomous driving. In addition to local vehicle perception based on cameras, LiDAR sensors and highly accurate digital maps, the overall system also provided a wireless interaction between the deliverer and the vehicle as well as between the vehicle and a remote command control center.

The final evaluation results show that the developed solution is able to significantly increase the efficiency on the last mile of parcel delivery.

19. keywords

Automated Vehicle, Connected Vehicle, Highly Automated Driving Functions, Logistics, Delivery, Safety, Last Mile, Runtime Monitoring, Human Intervention, Vehicle Routing, Communication, Car2x, Wireless, Indoornavigation, Dependability Cage, Motionboard, Localization, Perception, LiDAR, Remote Control, Emergency Brake

20. publisher

-

21. price

-

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel VanAssist – Interaktives, intelligentes System für autonome fernüberwachte Kleintransporter in der Paketlogistik (Projektübergreifender Schlussbericht)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Seber, Gerd (Projektkoordinator) Czerwionka, Paul Hegerhorst, Torben Schappacher, Manuel Schumann, Detlef Stürmer, Thorsten von Bergner, Alexander Wilken, Nils Zhang, Meng	5. Abschlussdatum des Vorhabens Juni 2021
	6. Veröffentlichungsdatum 30.06.2021
	7. Form der Publikation Dokument
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Bridging IT GmbH DPD Deutschland GmbH Hochschule Offenburg, Institut für verlässliche Embedded Systems und Kommunikationselektronik (ivESK) IAV GmbH Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr Ibeo Automotive Systems GmbH Technische Universität Braunschweig, Institut für Fahrzeugtechnik (IfF) Technische Universität Clausthal, Institut für Software and Systems Engineering Universität Mannheim, Institut für Enterprise Systeme (InES)	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 16AVF2139
	11. Seitenzahl 86
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) 11030 Berlin	13. Literaturangaben 21
	14. Tabellen 0
	15. Abbildungen 55
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projektträger VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, Steinplatz 1, 10623 Berlin 30. Juni 2021	

18. Kurzfassung

Um das hohe Aufkommen an Paketlieferungen bewältigen zu können, ist bei den Paketdiensten besonders in der Paketsortierung ein hoher Automatisierungsgrad feststellbar. Für die eigentliche Paketzustellung – die sogenannte letzte Meile – besteht aber noch großes Potenzial zur Effizienzsteigerung, das angesichts der sich gleichzeitig verschärfenden Rahmenbedingungen (immer größere Paketmenge, voranschreitende Urbanisierung etc.) erschlossen werden muss.

Einen Ansatz dazu bietet das automatisierte Fahren (SAE-Level 4 und 5) mit elektrisch angetriebenen Fahrzeugen (Geräuscharm, Emissionsfreiheit, Eignung für Fahrten mit vielen Starts und Stopps). Diese Kombination stand im Mittelpunkt des vorliegenden Vorhabens.

Hauptziel des Projekts VanAssist war die Entwicklung einer integrierten Fahrzeug- und Systemtechnologie, die eine weitgehend emissionsfreie und automatisierte Zustellung von Gütern in urbanen Zentren ermöglicht. Dabei standen die folgenden Punkte im Vordergrund:

- Steigerung der Effizienz der Zustellung, indem redundante Arbeitsschritte minimiert und automatisiert werden.
- Entlastung der Zusteller durch ein intelligentes automatisiertes Fahrzeugsystem.

Der Lösungsansatz entspricht einer intelligenten Assistenz für die Paketzustellung durch automatisierte Fahrfunktionen von elektrisch angetriebenen Versuchsfahrzeugen. Der Versuchsträger wurde prototypisch auf Basis eines sog. Motionboards aufgebaut und mit entsprechender Sensorik, Fahrzeugrechnern, Aufbau und Nutzerschnittstellen ausgestattet, um autonom agieren zu können. Neben der fahrzeuglokalen Perzeption auf Basis von Kameras und LiDAR-Sensoren sowie hochgenauer digitaler Karte sah das Gesamtsystem darüber hinaus auch eine funkbasierte Interaktion zwischen Zusteller und Fahrzeug sowie zwischen Fahrzeug und einem Remote Leitstand vor. Die entwickelte Gesamtlösung wurde zum Abschluss des Projekts einem gründlichen Systemtest unterzogen und konnte den Nachweis erbringen, dass mit diesem innovativen Zustellprozess wesentliche Effizienzsteigerungen realisiert werden können.

19. Schlagwörter

Autonomes Fahren, Hochautomatisierte Fahrfunktionen, Logistik, Paketzustellung, Letzte Meile, Kommunikation, Indoornavigation, Dependability Cage, Absicherung, Motionboard, Lokalisierung, Perzeption, LiDAR, Car2x, Sicherheit, Laufzeitüberwachung, Menschlicher Eingriff, Leitstand, Tourenplanung, Notbremssystem

20. Verlag

-

21. Preis

-



VanAssist – Interaktives, intelligentes System für autonome fernüberwachte Kleintransporter in der Paketlogistik

Schlussbericht VanAssist

Förderkennzeichen		16AVF2139
Förderkennzeichen der Projektpartner	DPD	16AVF2139A
	BIT	16AVF2139B
	HSO	16AVF2139C
	IAV	16AVF2139D
	TUC	16AVF2139E
	InES	16AVF2139F
	IfF	16AVF2139H
	Ibeo	16AVF2139I
Laufzeit des Vorhabens		01.10.2018 bis 30.06.2021
Berichtszeitraum		01.10.2018 bis 30.06.2021

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	11
2	Projektidee, Zielsetzungen, Aufgabenstellung, Projektstruktur	13
2.1	Projektidee	13
2.2	Zielsetzungen	14
2.2.1	AP 1 Projektkoordination (DPD)	15
2.2.2	AP 2 Anforderungen und Gesamtsystemarchitektur (DPD).....	15
2.2.3	AP 3 Hochgenaue Lokalisierung und hochauflösende Karten (IAV).....	16
2.2.4	AP 4 Fahrzeugsetup / -inbetriebnahme (IfF)	16
2.2.5	AP 5 Car2x (HSO)	16
2.2.6	AP 6 Automatisierte Fahrfunktionen (IBEO).....	17
2.2.7	AP 7 Leitstand: Überwachung und Interaktion (TUC).....	17
2.2.8	AP 8 Kooperation (Lead: InES / Mitwirkend: BIT)	17
2.2.9	AP 9 Systemintegration (IfF).....	17
2.2.10	AP 10 Systemtest & Evaluierung (DPD)	17
3	Herausforderungen, untersuchte Methoden, Ergebnisse	19
3.1	AP1 Projektkoordination (DPD).....	19
3.2	AP2 Anforderungen und Gesamtsystemarchitektur (DPD).....	19
3.3	AP3 Hochgenaue Lokalisierung und hochauflösende Karten (IAV)	22
3.4	AP4 Fahrzeugsetup / -inbetriebnahme (IfF)	24
3.5	AP5 Kommunikation (HSO).....	29
3.5.1	Definition der Kommunikations- und Sicherheitsarchitektur	30
3.5.1.1	Komponenten	30
3.5.1.2	Kommunikationskanäle	31
3.5.1.3	Sicherheitsarchitektur.....	31
3.5.2	Kommunikation zwischen Zustellfahrzeug und Verkehrsteilnehmer.....	32
3.5.3	Kommunikation zwischen Zustellfahrzeug und Zusteller.....	33
3.5.3.1	Primärkommunikation	33
3.5.3.2	Sekundärkommunikation.....	34
3.5.3.3	Kommunikation mit der Smartphone App.....	35
3.5.4	Sicherheitsfunktionen in der Kommunikation	36
3.5.5	Kommunikation mit dem Leitstand	37
3.5.5.1	Bediener Schnittstelle	38
3.5.5.2	Control Center Connector	38
3.5.5.3	Map-Server	39
3.6	AP6 Automatisierte Fahrfunktionen (IBEO)	39

3.7 AP7 Leitstand: Überwachung und Interaktion (TUC)	46
3.7.1 Einführung	46
3.7.2 Lösungsansatz	47
3.7.3 Projektergebnisse	52
3.8 Kooperation (InES)	60
3.8.1 Mobile Interaktion und Kommunikation zwischen Zusteller und autonomem Zustellfahrzeug	60
3.8.2 Intelligente Navigationsassistentz	64
3.9 Systemintegration (IfF)	66
3.10 Systemtest & Evaluierung (DPD)	71
4 Änderungen in der Zielsetzung	75
4.1 Versuchsträger	75
4.2 Sensorik	75
4.3 Demonstration	76
4.4 Zusammenfassung und erreichte Ziele	76
4.5 F&E-Ergebnisse von dritter Seite	77
5 Öffentlichkeitswirksame Maßnahmen	78
5.1 Abschlusspräsentation	78
5.2 Konferenzbeiträge und Publikationen	78
5.3 Dissertationen	79
5.4 Pressearbeit	80
5.5 Internetauftritt	80
5.6 Projektvideos	80
6 Ergebnisverbreitung und Verwertungsplan	82

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht der Gesamtsystemarchitektur.	19
Abbildung 2: Struktur der Item Definition anhand ISO26262:2018.	21
Abbildung 3: 3D Karte (IAV).	23
Abbildung 4: Lokalisierung IAV.	24
Abbildung 5: HFM Motionboard im Anlieferungszustand.	25
Abbildung 6: Sicherheitskonzept des Versuchsträgers.	25
Abbildung 7: Versuchsträger PLUTO mit Unterkonstruktion und Laserscannern.	26
Abbildung 8: Versuchsträger PLUTO mit Aufbau und HMI.	27
Abbildung 9: 360° Sensorsetup.	28
Abbildung 10: Verbauskitze LIDAR IAV.	29
Abbildung 11: Verbauskitze AreaView Kameras IAV.	29
Abbildung 12: Hardwareaufbau der ComBoxen.	30
Abbildung 13: Darstellung der Kommunikations- und Sicherheitsarchitektur.	32
Abbildung 14: Architektur des ChirpStacks auf der Fahrzeug-ComBox.	35
Abbildung 15: Ausschnitt aus der ComBox BLE Spezifikation.	36
Abbildung 16: Authentifizierungsprozess zwischen der Leitwarte und dem Logistikzentrum.	37
Abbildung 17: Authentifizierungsprozess zwischen SBox und Logistikzentrum.	37
Abbildung 18: Authentifizierungsprozess zwischen VBox und Logistikzentrum.	37
Abbildung 19: Darstellung der Kommunikationsprotokolle in der Netzwerkarchitektur.	39
Abbildung 20: Modulare Top-Layer-Funktionsarchitektur der IfF-Fahrfunktion.	40
Abbildung 21: Konzept der Bewegungsplanung.	41
Abbildung 22: Demoszenario mit ODR-Karte (weiß): 1) Fahren im Depot, 2) Wendehammer.	41
Abbildung 23: Suchbaum und gewählter Pfad des Freiraumplaners in der Simulation.	42
Abbildung 24: Geglätteter Pfad (rot) mit überstrichener Fläche (grau).	43
Abbildung 25: links: Krümmung des Pfades, rechts: Szenario und geplanter Pfad.	44
Abbildung 26: Lokaler Pfadplaner – links: abstrahiertes Szenario, rechts: geplanter Pfad (Simulation).	44
Abbildung 27: Entwickelte Display-Screens für das externe HMI.	45
Abbildung 28: Schematische Darstellung des AEB.	46
Abbildung 29: Use-Cases für die kooperative Sicherheitslösung im AP7.	47
Abbildung 30: Übergreifende Architektur für die gesamte kooperative Sicherheitslösung.	49
Abbildung 31: Abstrakte Komponentenarchitektur des Onboard. Laufzeitüberwachungssystems „Dependability Cage“	50

Abbildung 32: Übergreifendes Konzept zur Verantwortungsverteilung zwischen dem autonomen System und menschlichen Sicherheitsbeauftragter mit Interventionsniveaus.....	51
Abbildung 33: Verantwortungsübergabe durch „Graceful Degradation“ in verschiedenen Interventionsniveaus.....	52
Abbildung 34: TUC-Laborumgebung zur Evaluation und Demonstration der Sicherheitslösung.	52
Abbildung 35: Komponentensicht des „Dependability Cages“.....	54
Abbildung 36: Visualisierung der Sensoren im Leitstand-GUI V1.0 während eines..... Hindernisses auf der Fahrbahn.....	55
Abbildung 37: Visualisierung der Sensoren im Leitstand-GUI V1.0 bei verdeckter Kamera.....	56
Abbildung 38: Missionskontrolle und Menschlicher Eingriff im Leitstand-GUI V1.0.	57
Abbildung 39: Fernsteuerung des autonomen Fahrzeugs im Leitstand-GUI V1.0.....	57
Abbildung 40: Leitstand-GUI V2.0 im Szenario „Problemfall: Fahrbahnverengung wegen Hindernisse“.	59
Abbildung 41: Leitstand-GUI V2.0 im Szenario „Problemfall: Kameraabdeckung“.	59
Abbildung 42: Screenshots des Outdoor-App-Prototyps.....	61
Abbildung 43: Gewählte Location Provider für die Verortung des Zustellers.	62
Abbildung 44: Ablauf eines Zustelltages aus Sicht des Fahrzeugs.	63
Abbildung 45: Schematische Darstellung der ersten Version des..... Routenoptimierungsansatzes.	66
Abbildung 46: Schematische Darstellung der zweiten Version des..... Routenoptimierungsansatzes.	66
Abbildung 47: GUI zur Aktivierung des automatisierten Fahrsystems.....	67
Abbildung 48: Vernetzungsplan der Partnersysteme im Fahrzeug.	68
Abbildung 49: Fahrzeugrumpf mit verbauten Systemen.	68
Abbildung 50: Kalibrierte Punktwolke.	69
Abbildung 51: Systemarchitektur nach der Integration.....	70
Abbildung 52: Testaufbau für das AEB mit Dummy.	72
Abbildung 53: Darstellung Fahrzeughülle in Kombination mit Scannereinheiten.....	74
Abbildung 54: Dreharbeiten zur Indoornavigation des Projekts VanAssist in Heidelberg im Dezember 2020	81
Abbildung 55: Komplett aufgebauter und funktionsfähiger VanAssist Versuchsträger im Rahmen der Dreharbeiten für das Imagevideo Anfang Juni 2021 in Braunschweig.....	81

1 Zusammenfassung

Um das hohe Aufkommen an Paketlieferungen bewältigen zu können, ist bei den Paketdiensten besonders in der Paketsortierung bereits heute ein hoher Automatisierungsgrad feststellbar. Für die eigentliche Paketzustellung – die sogenannte „Letzte Meile“ – besteht jedoch noch weiteres Potenzial zur Effizienzsteigerung, das angesichts der sich gleichzeitig verschärfenden Rahmenbedingungen (immer größere Paketmenge, voranschreitende Urbanisierung etc.) erschlossen werden muss.

Einen Ansatz dazu bietet das automatisierte Fahren (SAE-Level 4 und 5) mit elektrisch angetriebenen Fahrzeugen (Geräuscharm, Emissionsfreiheit, Eignung für Fahrten mit vielen Starts und Stopps). Diese Kombination stand im Mittelpunkt des vorliegenden Vorhabens.

Hauptziel dieses Projekts war daher die Entwicklung einer integrierten Fahrzeug- und Systemtechnologie, die eine weitgehend emissionsfreie und automatisierte Zustellung von Gütern in urbanen Zentren ermöglicht. Dabei standen die folgenden Punkte im Vordergrund:

- Steigerung der Effizienz der Zustellung, indem redundante Arbeitsschritte minimiert und automatisiert werden.
- Entlastung der Zusteller durch ein intelligentes automatisiertes Fahrzeugsystem.

Im Projekt wurden dabei die folgenden (technologischen) Inhalte konkret umgesetzt:

- Aufbau eines eigenen prototypischen Versuchsträgers auf Basis eines sog. Motionboards (einer modularen Fahrzeugplattform, speziell für automatisiertes Fahren entwickelt), welcher mit entsprechender Sensorik, Fahrzeugrechnern, Aufbau und Nutzerschnittstellen ausgestattet wurde, um autonom agieren zu können,
- Realisierung einer Umfeldwahrnehmung und exakter Positionierung des Versuchsträgers mit Hilfe von LiDAR-Sensorik, Kameras und einer digitalen, hochauflösenden Karte,
- komplette Ausgestaltung und Integration eines Fahrzeugchassis auf dem Motionboard, in Form, Optik und Nutzbarkeit einem realen Zustellfahrzeug angelehnt,
- Realisierung einer funkbasierten und sicheren Interaktion zwischen dem ausliefernden Zusteller und dem automatisierten Fahrzeug,
- Autonomes und durch einen Leitstand fernüberwachtes Fahren auf Betriebsgeländen (Rangiervorgänge) und in urbanen Umgebungen,
- Entwicklung, Test und Realisierung von Safety-Mechanismen in Form eines automatisierten Notbremsystems (AEB) mit sensorbasierter Fußgänger-/VRU-Erkennung,
- Funkbasierte Interaktion zwischen Zusteller und Fahrzeug,
- Indoornavigation des Zustellers mit Hilfe einer Navigationssoftware sowie Ausstattung eines Gebäudekomplexes mit entsprechender technischer Sensorik,
- Entwicklung von Algorithmen zur Routenoptimierung von Fahrzeug und Zusteller: Outdoor als auch innerhalb eines Gebäudekomplexes (Indoor).

Im Projekt VanAssist mussten während der Laufzeit diversen Widrigkeiten bewältigt werden, die nichts mit den technologischen Entwicklungen oder der inhaltlichen Konzeption des Projekts selbst zu tun hatten: Neben dem Ausstieg eines Projektpartners (VW Nutzfahrzeuge) kurz nach Start des Vorhabens, waren die Arbeiten in VanAssist in besonderem Maße auch von den Auswirkungen der weltweiten Corona-Pandemie beeinträchtigt. Durch die Neubesetzung vakanter Inhalte sowie eine sechsmonatige zuwendungsneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit konnten jedoch alle Verzögerungen kompensiert und die gesetzten inhaltlichen Ziele erreicht werden. Die Effizienzsteigerung und der Zeitgewinn bei der Zustellung durch Unterstützung einer autonom fahrenden Plattform konnte nachgewiesen werden. Hierdurch eröffnen sich zukünftig weitere Optimierungspotenziale für den Logistikbereich: Durch ein autonom fahrendes Zustellfahrzeug wird der Paketzusteller in Zukunft in die Lage versetzt, wieder stärker ZUSTELLER als Fahrer zu sein.

Ein autonomes Fahrzeug entbindet den Zusteller nicht nur vom Vor- und Nachlauf ins Zustellgebiet, sondern hilft auch die Wegstrecken für den Zusteller zu reduzieren und so die Produktivitätszeit zu erhöhen. Durch eine optimale Kombination aus Fahrstrecke und Laufwegen werden die Effizienz der Paketzustellung erhöht und der Parksuchverkehr und etwaige Verkehrsbeeinträchtigungen und damit einhergehend CO₂-Emissionen reduziert. Dies ermöglicht neue Zustellkonzepte, zum Beispiel die optimierte Zustellung zu Fuß in Wohnquartieren, weil die autonomen Fahrzeuge die Pakete dorthin bringen, wo sie ideal durch den Zusteller übernommen werden können. Notwendige Voraussetzung dafür ist allerdings die Digitalisierung von Ladezonen und Haltemöglichkeiten, damit das Fahrzeug gezielt passende Standorte anfahren und bedarfsbezogen nutzen kann.

Als Ergebnis des VanAssist-Projektes sind außerdem weitere Handlungsfelder für die Forschung und Entwicklung von Hard- und Softwarelösungen für die Einbindung in die operativen Abläufe deutlich geworden. Da sich aus dem Einsatz autonomer Fahrzeuge und der damit verbundenen Sensorik und Interaktion mit der Umgebung derzeit noch vielfältige Herausforderungen ergeben, ist auch die Einbindung des Zustellers in die Prozesse zwischen dem Leitstand und dem Fahrzeug wichtig. Der im Projekt VanAssist definierte Leitstand muss dabei künftig die klassische Disposition ersetzen. Auch bei der Gestaltung der Hofflächen der Depots sowie der operativen Prozesse rund um die Fahrzeugplanung und den Fahrzeugeinsatz ergeben sich besondere Anforderungen. Die Erkenntnisse aus dem Projekt VanAssist geben dabei wichtige Impulse für weitere Forschungsprojekte und Produktentwicklungen.

2 Projektidee, Zielsetzungen, Aufgabenstellung, Projektstruktur

2.1 Projektidee

Für die Paket- und Expressverteilung in urbanen Räumen werden heutzutage vorwiegend Zusteller in konventionellen Fahrzeugen der sogenannten „Sprinterklasse“ eingesetzt. Dies ist personal- und kostenintensiv. So entfallen beispielsweise bis zu 25% der reinen Fahrzeit auf die An- und Abfahrt vom und zum Depot. Des Weiteren ist der Einsatz dieses Fahrzeugtyps aufgrund der Einsatzcharakteristik mit sehr vielen Anfahr- und Bremsvorgängen (durchschnittlich mehr als 80 Stopps pro Tag) mit Nachteilen wie Schadstoffemissionen, Verschleiß und Lärmbelastigungen verbunden. Der Ablauf bei der alltäglichen Paketzustellung folgt derzeit dem folgenden Schema:

- Morgens werden die Pakete anhand einer tagesabhängigen Route sortiert und entsprechend vom Zusteller ins Zustellfahrzeug geladen.
- Die Einsatzfahrt beginnt mit der Anfahrt in das Zielgebiet, welche in der Regel zwischen 10 und 50 km beträgt. Insbesondere für Touren in Ballungsgebiete nehmen dabei mehrere Fahrzeuge von der Niederlassung ausgehend die gleichen Wege.
- Im Einsatzgebiet angekommen beginnt die Verteilung der Pakete. Je nach Stoppverteilung und -dichte sind hier zwei Vorgehensweisen üblich:
- Der Zusteller stellt sein Fahrzeug an einem geeigneten Haltepunkt ab und arbeitet von dort aus mehrere Zustellungen zu Fuß ab. Hierbei muss er alle Auslieferungen mit sich tragen bzw. transportieren oder ggf. zwischendurch nochmals zum Fahrzeug zurückkehren.
- Der Zusteller stellt alle Zustellungen einzeln zu und fährt dabei von Stopp zu Stopp. Dadurch muss er immer nur die aktuelle Sendung tragen, muss aber das Fahrzeug ständig starten, weiterbewegen, stoppen, abstellen. Häufig können keine geeigneten Haltepunkte gefunden werden, was zu einer deutlichen Beeinträchtigung des Verkehrs führt.
- Nach Abarbeitung seiner Route fährt der Zusteller zurück in die Niederlassung. Auch hier nehmen ab einem gewissen Punkt mehrere Fahrzeuge die gleiche Rückfahrtstrecke.
- Im Verteilzentrum angekommen werden nicht zugestellte sowie abgeholte Pakete an dafür vorgesehenen Toren entladen. Je nach Aufkommen an rückkehrenden Zustellfahrzeugen entstehen hierbei Wartezeiten.

Betrachtet man diesen Ablauf, so werden eine Reihe von Optimierungsansätzen deutlich:

- Viele Fahrzeuge haben eine täglich nahezu gleiche Anfahrtstrecke von der Niederlassung ins Zielgebiet bzw. bis zu einem bestimmten Knotenpunkt. Dabei verrichten alle Fahrer exakt die gleiche Aufgabe – diese Prozesse bieten sich für eine Automatisierung an.
- Während der Zustellung können die zu Fuß zurückzulegenden Wegstrecken reduziert werden, indem das Fahrzeug sich bei der gemeinsamen Zustellung mehrerer Stopps automatisiert zum nächsten vom Zusteller vorgegebenen Haltepunkt bewegt und somit der (mehrfache) Rückweg zum Fahrzeug entfällt. Gleichzeitig wird dadurch die Zahl der einzelnen Fahrzeugbewegungen reduziert. Indem der Zusteller über eine entsprechende Hard- und Software das Fahrzeug aus der Distanz zu bestimmten Haltepunkten sendet, wird eine kontinuierliche Bewegung des Zustellers entlang der von ihm geplanten Route erreicht, wobei die unproduktiven Wegstrecken zurück zum Fahrzeug entfallen. Hierin liegt mit einer geschätzten Produktivitätssteigerung von 10% das größte Potenzial.
- Beim Bewegungsprofil der Fahrzeuge im Zustellgebiet mit häufigen Start- und Stoppvorgängen bei kurzen Wegstrecken können elektrisch angetriebene Fahrzeuge ihre Stärken besser ausspielen als verbrennungsmotorgetriebene Fahrzeuge.

2.2 Zielsetzungen¹

Ausgehend von den dargestellten Potenzialen stand im Mittelpunkt des Projekts VanAssist, eine integrierte Fahrzeug- und Systemtechnologie zu entwickeln, die eine weitgehend emissionsfreie und automatisierte Zustellung von Gütern in urbanen Zentren ermöglicht. Dabei standen die folgenden Ziele im Vordergrund:

- Steigerung der Effizienz der Zustellung indem redundante Arbeitsschritte minimiert und automatisiert werden,
- Entlastung des Zustellers durch ein intelligentes automatisiertes Fahrzeugsystem,

Ausgehend von der genannten Zielstellung sollten im Projekt folgende für das automatisierte elektrische Fahren zentrale Innovationsbereiche vorangetrieben werden, um das Stadium eines Prototypen für die entwickelten Technologien zu erreichen:

1. Autonomes und durch einen Leitstand fernüberwachtes Fahren auf Betriebsgeländen (Rangiervorgänge) und in urbanen Umgebungen.
2. Intelligente Assistenz für die Paketzustellung durch autonome Fahrfunktionen von elektrischen Transportfahrzeugen.

Im Projekt wurde hierfür ein batterieelektrisch fahrendes Motionboard des Herstellers Hanseatische Fahrzeug Manufaktur beschafft und als autonomes Versuchsfahrzeug für die Paketzustellung aufgebaut. Dabei handelte es sich um ein modulares Fahrzeugchassis in der Größe eines Kleintransporters, das sowohl Einsatzanforderungen im Depot als auch im urbanen Zustellumfeld erfüllen sollte. Durch den Einbau von Sensoren, Steuerung- und Regelungstechnik sowie Absicherungsrechnern und Kommunikationsschnittstellen wurde ein Forschungsprototyp geschaffen, der eine reale Darstellung der betrachteten Anwendungsfälle ermöglichte. Neben der Entwicklung der autonomen Fahrfunktion stand dabei auch die Erstellung eines geeigneten Sicherkonzepts im Vordergrund.

Der Zustellprozess insgesamt sollte effizienter gestaltet werden, indem der bisherige Zustellprozess mit Einsatz intelligenter autonomer Zustellfahrzeuge wie folgt abgewandelt wird:

1. Das Zustellfahrzeuge wird in der DPD-Niederlassung entsprechend vorkalkulierter Sortierung und Routenplanung beladen.
2. Es wird ein Treffpunkt definiert, an dem sich das Zustellfahrzeug mit seinem Zusteller trifft. Das Zustellfahrzeug fährt komplett autonom und unbemannt zu diesem Treffpunkt nahe des Zustellgebiets. Dort übernimmt der Zusteller das Fahrzeug und beginnt die eigentliche Zustelltour. Durch die autonome Fahrt bis zum Treffpunkt steht dem Zusteller mehr Arbeitszeit für den eigentlichen Zustellungsprozess zur Verfügung.
3. Während der Paketverteilung wird der Zusteller von seinem intelligenten Zustellfahrzeug unterstützt. Fahrzeug und Fahrer sind dazu stets über ein Steuerelement miteinander verbunden, sodass der Zusteller dem Fahrzeug Befehle erteilen bzw. dessen Status einsehen kann. Die Zustellung erfolgt im "Rendezvous-Modus": Hierbei entnimmt der Zusteller eine bestimmte Anzahl an Zustellungen aus dem Fahrzeug, die eine optimierte Laufroute des Zustellers ermöglichen. Dann teilt er dem Fahrzeug den nächsten anzufahrenden



¹ Die hier dargestellten Inhalte geben die mit Projektträger und Fördergeber aktualisierte Struktur und inhaltliche Ausgestaltung nach Ausstieg des ursprünglichen Partners VW Nutzfahrzeuge dar. Für eine Abgrenzung der ursprünglichen Inhalte zum Zeitpunkt des Projektstarts am 01.10.2018 mit den tatsächlich im Projekt umgesetzten Arbeiten siehe Kapitel 4: Änderungen in der Zielsetzung.

Haltepunkt mit. Das Fahrzeug bewegt sich autonom dorthin und wartet auf den Zusteller.

4. Nach Abschluss der Zustellungstour fahren Zusteller und Fahrzeug zurück zum ursprünglichen Sammelpunkt. Dort angekommen meldet er sich ab und schickt das Fahrzeug autonom ins Depot zurück.
5. Der Leitstand im Depot befiehlt die zurückgekehrten Fahrzeuge so zur Entladung nicht zugestellter Pakete zu Entladerampen bzw. zur Aufladung zu Batterie-Ladestationen, dass die vorhandenen Ressourcen möglichst effizient genutzt werden. Die Fahrzeuge bewältigen auch diese Strecken autonom.

Mit diesem innovativen Zustellprozess konnten wesentliche Effizienzsteigerungspotenziale realisiert werden:

- Alle Fahrten im Verteilzentrum und zum Treffpunkt mit dem Zusteller erfolgen autonom und unbemannet, sodass deutlich mehr Arbeitszeit des Zustellers auf den Zustell- bzw. Abholprozess entfällt.
- Der Zustellprozess wird optimiert, indem Lauf- und Fahrstrecken optimal miteinander kombiniert und teilweise parallel zurückgelegt werden. Dadurch werden die Laufwege des Zustellers optimiert und „leere“ Rückwege zum Fahrzeug reduziert. Das Fahrzeug trägt sozusagen im Zustellprozess die Pakete autonom zum bestmöglichen Übergabepunkt an den Zusteller.

Nachfolgende Partner aus Logistik, Industrie und Wissenschaft waren Teil des VanAssist-Konsortiums:

- Bridging IT GmbH (BIT)
- DPD Deutschland GmbH (DPD)
- IAV GmbH (IAV)
- Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig (IfF)
- Institut für verlässliche Embedded Systems und Kommunikationselektronik, Hochschule Offenburg, (HSO)
- Ibeo Automotive Systems GmbH (IBEO)
- Institut für Software and Systems Engineering, TU Clausthal (TUC)
- Institut für Enterprise Systeme (InES), Universität Mannheim (InES)

Zu Beginn der Projektlaufzeit war auch VW Nutzfahrzeuge (VWN) als OEM und potenzieller Lieferant der Versuchsfahrzeuge Teil des Projektkonsortiums. Nach Ausscheiden aus dem Projekt kurz nach Start des Vorhabens, wurden mit IBEO und IfF zwei neue Partner identifiziert und integriert, die die inhaltlichen Schwerpunkte des ursprünglichen Partners VWN übernommen haben.

Um die Herausforderungen im Projekt zu bewältigen, wurden zehn Arbeitspakete eingeführt:

2.2.1 AP 1 Projektkoordination (DPD)

Die Projektkoordination wurde in enger Abstimmung mit allen Projektpartnern durch DPD übernommen und umfasste alle Aufgaben der zentralen Administration, Organisation und Kommunikation. Hierbei unterstützte ZENTEC als Projektsupport.

2.2.2 AP 2 Anforderungen und Gesamtsystemarchitektur (DPD)

Dieses Arbeitspaket umfasste die Erhebung der Anforderungen in Bezug auf die unterschiedlichen Szenarien. Weiterhin wurden verschiedene Komponenten eingebracht, z.B. Fahrzeuge, Sensoren, Logistik-spezifische Hard-/Software, sowie diverse Fahrzeugfunktionen, welche die Grundlage für die szenario-spezifische Anforderungserhebung und -verfeinerung bildeten.

Gleichzeitig bildeten die unterschiedlichen Komponenten und Szenarien die Grundlage für die Spezifikation einer integrierten Prozess- und Werkzeugkette.

2.2.3 AP 3 Hochgenaue Lokalisierung und hochauflösende Karten (IAV)

Präzise Eigenlokalisierung ist grundlegende Voraussetzung für die Realisierung des automatisierten Fahrens:

Hochauflösende Karte

Hochgenaue Karteninformation stellen eine wichtige Grundlage für effizientes Fahren dar. Für die Vorausplanung eines optimalen Wegs (bzgl. Höhenprofil, Fahrdauer, Fahrstrecke, Anzahl der Kreuzungen, Anzahl der zu erwartenden Spurwechsel) von einem Ort zu einem bestimmten Ziel sind sie unabdingbar.

Visuelle Lokalisierung

Da zum Zeitpunkt der Projektlaufzeit kein verfügbarer Sensor die Reichweitenanforderung erfüllen konnte, wurde das Wissen über die zu erwartende Situation (v.a. Straßentopologie, aber auch für Sensorik „unsichtbare“ Verhaltensregeln) in eine hochgenaue und hochaktuelle Karte verlagert. Weiterhin wurde diese Karte zur präzisen Ortung genutzt, da sich über ein handelsübliches Global Navigation Satellite System, wie z.B. GPS, die benötigte Präzision nicht erreichen ließ. Daher wurde für die Umsetzung der automatisierten Fahrsituationen ein Vergleich von wahrgenommenen statischen Objekten (Landmarken, wie z.B. Verkehrsschilder, Leitplanken) mit a priori bekannten Verhältnissen verwendet.

Aktualisierung der Karte via Car2x

Da sich die Straßenverhältnisse stetig verändern, ist ein konstantes Update der Karten erforderlich. Dies bedingt eine Verbindung der Fahrzeuge zu einem Backend-System. Während die Kommunikation mit dem Backend für HAF absolut erforderlich ist, erfolgte die Car2x-Kommunikation in der Ausprägung Car2Car und Car2Infrastructure im aktuellen Stand der Technik getrennt von automatisierten Fahrfunktionen. Eine Verknüpfung beider Technologien war notwendig und sollte zu einer gesteigerten Reichweite und Effizienz sowie zu einer effektiveren Erkennung und Vermeidung von gefährlichen Verkehrssituationen führen.

2.2.4 AP 4 Fahrzeugsetup / -inbetriebnahme (IfF)

Im Mittelpunkt dieses Arbeitspakets stand die Vorbereitung, Koordination und Durchführung des Fahrzeugaufbaus, d.h. die Umrüstung und Modifikation der Plattform Motionboard, Festlegung und Aufbau des Sensor-Setups sowie die Inbetriebnahme des Versuchsträgers.

Weiterhin wurde ein erweitertes Sicherheitskonzept für das Versuchsfahrzeug in Form der sensorbasierten Detektion von Gefahrenquellen (z.B. Fußgänger tritt auf Fahrbahn) und eines automatisierten Notbremssystems entwickelt und umgesetzt.

2.2.5 AP 5 Car2x (HSO)

Kommunikation zwischen Zustellfahrzeug und Verkehrsteilnehmern

Die Car2x-Kommunikation beschäftigte sich mit der Kommunikation zwischen mehreren Zustellfahrzeugen, zwischen einem Zustellfahrzeug und anderen Verkehrsteilnehmern, als auch zwischen einem Zustellfahrzeug und Infrastrukturelementen.

Kommunikation zwischen Zustellfahrzeug und Zusteller

Das Zustellfahrzeug und der Zusteller sollten über einen gesicherten Kommunikationskanal miteinander kommunizieren können. Dazu wurde eine Funkkommunikation aufgebaut, die es ermöglichte, Status- und Steuerkommandos miteinander auszutauschen.

Sicherheitsfunktionen in der Kommunikation

Für die Kommunikation wurden funkbasierte Lösungen verwendet. Aufgrund des Umfeldes und der sicherheitskritischen Anwendung mussten hierbei diverse Anforderungen wie Verfügbarkeit, Qualität und Reichweite der Kommunikation und Verschlüsselung berücksichtigt werden.

Kommunikation mit dem Leitstand

Zusätzlich zur Nahbereichskommunikation sollte auch eine Kommunikation zum Leitstand hergestellt werden. Dadurch wurden Leitstand, Zustellfahrzeug und Zusteller in die Lage versetzt, kontinuierlich Informationen auszutauschen.

2.2.6 AP 6 Automatisierte Fahrfunktionen (IBEO)

Für Automatische Fahrfunktionen werden die Daten der Umfoldsensoren, der Bewegungssensoren und des Onlinekartematerials in einem Softwaremodul, genannt Umfeldmodell, aufbereitet und zusammengefasst. Das Ergebnis ist ein gesamtheitliches dreidimensionales Abbild der Umgebung. Basierend auf dem Umfeldmodell werden im nächsten Modul die Szene interpretiert und mögliche zukünftige Szenarien berechnet. Ist ein möglicher Verlauf der Szene berechnet, wird das eigene Fahrmanöver darauf angepasst und ein sicherer Fahrweg geplant. Die daraus resultierenden Steuersignale werden an die Aktuatoren geleitet und somit ein Fahrmanöver durchgeführt.

Die Arbeiten innerhalb dieses Arbeitspakets beinhalteten unter anderem die Funktionen des Fahrzeugs für eine komplett autonome Fahrt auf dem Depotgelände (SAE Level 5) sowie die fernüberwachte automatisierte Fahrt in urbaner Umgebung.

2.2.7 AP 7 Leitstand: Überwachung und Interaktion (TUC)

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Entwicklung eines Online-Überwachungssystems – einen sog. Leitstand – für autonome Fahrzeuge zu entwickeln, das unsichere Situationen erkennen und behandeln hilft. Der Leitstand sollte unterschiedliche Systemeigenschaften überwachen, welche im Rahmen der Spezifikation der Anforderungen bzgl. der funktionalen Sicherheit identifiziert werden. Das auf dem Leitstand basierende Überwachungsverfahren musste Verletzungen von Systemeigenschaften schnell erkennen und darauf reagieren können.

2.2.8 AP 8 Kooperation (Lead: InES / Mitwirkend: BIT)

Ziel dieses Arbeitspaketes war ein „intelligentes“ Assistenzsystem für den Paketzusteller auf Basis automatisierter Fahrzeuge zu entwickeln. In diesem selbst-lernenden System sollten Zusteller, automatisiertes Zustellfahrzeug, Leitstand und das DPD-Logistiksystem kooperieren und damit den Zustellprozess in urbanen Räumen auf der letzten Meile optimieren.

2.2.9 AP 9 Systemintegration (IfF)

Dieses Arbeitspaket behandelte die Integration der Projekt(teil)ergebnisse in die Systeminfrastruktur, d.h. primär in die verwendeten Fahrzeuge und die dazugehörigen Unterstützungssysteme.

2.2.10 AP 10 Systemtest & Evaluierung (DPD)

In diesem Arbeitspaket wurden Methoden entwickelt, die auf die Automatisierung der Validierung und Zertifizierung von automatisierten Fahrfunktionen abzielten. Insbesondere betraf dies die beiden Arbeitsfelder:

- **Strukturiertes Testen:** Es sollten Testmethoden für die automatisierte Ableitung von Testsuiten aus Spezifikationen für autonome Fahrfunktionen entwickelt werden.

- Modellbasierte Konformitätsprüfung: Die im Projekt ausgeführten Arbeiten reichten bis zu Stufe 4 des automatisierten Fahrens und hatten somit hohe Anforderungen hinsichtlich der Systemsicherheit und Verlässlichkeit. Somit war es erforderlich, dass das System konform zu Sicherheitsstandards zu entwickeln.

3 Herausforderungen, untersuchte Methoden, Ergebnisse

3.1 AP1 Projektkoordination (DPD)

Die Projektkoordination umfasste alle Tätigkeiten des klassischen Projektmanagements wie die Abstimmung von Projektregelterminen und Projekttreffen, die Ergebniskontrolle der Arbeitspakete, die Projektdokumentation und das projektpartnerübergreifende Berichtswesen. Eine wichtige Aufgabe dabei war auch die projektbegleitende Ergebniskontrolle, also die fortwährende Ausrichtung der Teil- und Zuarbeiten am vereinbarten Projektergebnis sowie wenn nötig die Anpassung der Projektziele an geänderte Voraussetzungen und Rahmenbedingungen. Diese Aufgabe gewann aufgrund der eingangs beschriebenen Widrigkeiten im Projektverlauf noch an Bedeutung. So musste insbesondere die geplante Projektergebnispräsentation zuerst aufgrund der veränderten Projektpartner aus dem öffentlichen Raum auf den Campus der TU Braunschweig verlegt werden. Später mussten Form und konkrete Inhalte der geplanten Präsentation und Demonstration des Fahrzeugs aufgrund der coronabedingten Einschränkungen mehrfach angepasst werden.

Bei Teilen des Projektmanagements wurde DPD von der Firma ZENTEC unterstützt, beispielsweise in Form der Bereitstellung einer Onlineplattform zur Verwaltung und Speicherung der Projektdokumentation und der Nutzung deren Onlinemeetingsystems.

3.2 AP2 Anforderungen und Gesamtsystemarchitektur (DPD)

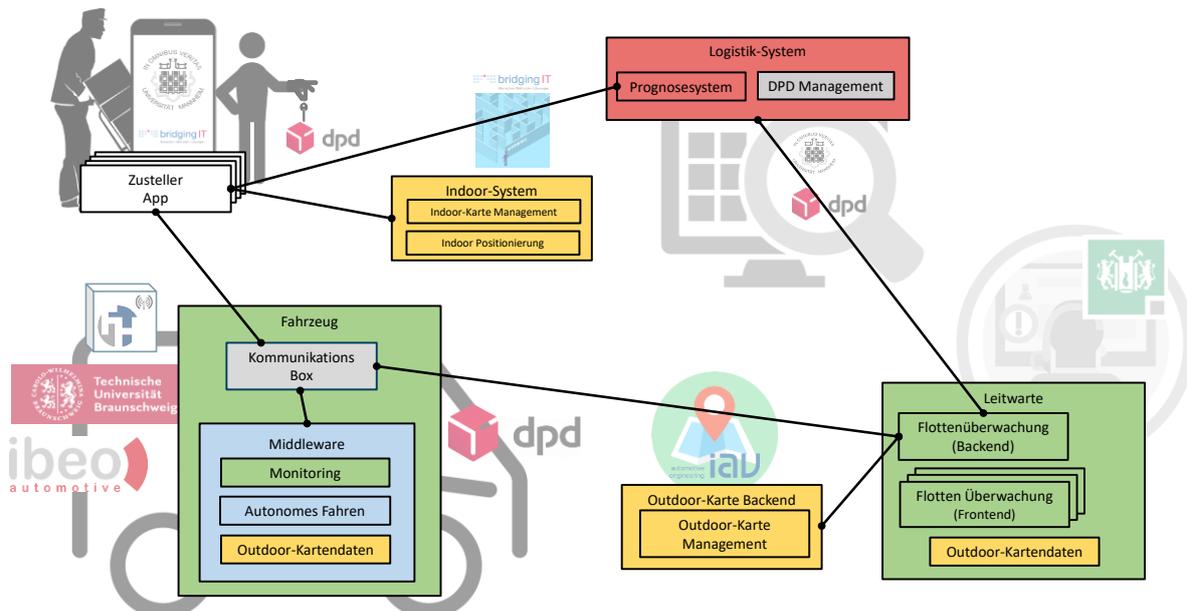


Abbildung 1: Übersicht der Gesamtsystemarchitektur.

Die Gesamtsystemarchitektur wurde entsprechend der gemeinsam definierten Use Cases, welche das Fahrzeug bedienen sollte, aufgrund der bestehenden technischen Möglichkeiten und Forschungsstände entwickelt. Grundlage waren die tatsächlichen operativen Abläufe und Prozesse bei der Paketzustellung, welche so weit wie technisch möglich durch das autonome Fahrzeug optimiert und verbessert werden sollten. Dabei mussten einerseits gesetzliche Vorgaben wie zum Beispiel die Notwendigkeit eines Sicherheitsfahrers beachtet werden, andererseits ergaben sich Grenzen der verfügbaren Funktionen aus deren technischer Umsetzbarkeit im Rahmen der Projektlaufzeit.

Neben den eigentlichen Funktionen des Fahrzeugs mussten insbesondere die im Projekt mitentwickelten Zusteller-Apps und die Funktion der Leitwarte von allen Projektpartnern

gemeinsam detailliert definiert werden, da beide Systeme die eigentliche Steuerung bzw. Zielsetzung des Fahrzeugs verantworten.

Nach der finalen Abstimmung der Gesamtsystemarchitektur im gesamten Projektkonsortium wurden alle nötigen Schnittstellen zwischen Zusteller-App, Logistikzentrum, ComBox und Fahrzeugsystem identifiziert und spezifiziert. Mit dem Fortschreiten der Entwicklungen der prototypischen Systeme, wurden die zuvor initial definierten Schnittstellenspezifikationen nochmals weiter verfeinert und finalisiert. Dabei wurden auch die Anforderungen, die sich aus dem im Konsortium abgestimmten Demonstrationsszenario ergeben haben, berücksichtigt.

Für die Definition der Kommunikation erfolgte primär die Betrachtung der Kommunikationswege, die Einflüsse auf den fokussierten Anwendungsfall haben. Folgende Punkte sind hierbei am relevantesten:

- Die Kommunikation zwischen dem Fahrzeug und dem Zusteller muss ausfallsicher sein. Um dies zu erreichen, wurde eine Notfallkommunikation über eine so genannte redundante Sekundärkommunikation vorgesehen, die in dem Fall aktiv wird, wenn der primäre Kommunikationskanal ausfällt. Es reicht hierbei aus, dass der Sekundärkanal nur einen Teil der Funktionen des Primärkanals unterstützt.
- Die Primärkommunikation soll eine möglichst hohe Datenrate aufweisen. So sollen z.B. Videobilder übertragen werden können.
- Die gesamte Kommunikation muss abgesichert sein. Dies gilt sowohl hinsichtlich der Abhörsicherheit als auch bezüglich des Schutzes gegen versehentliche oder vorsätzliche Falscheingriffe in das System.
- Die Backend-Infrastruktur muss dem Anwendungsfall entsprechend gegeben und vernetzt sein und die nötigen Schnittstellen nach außen definieren und bereitstellen.

Anhand der gegebenen Anforderungen wurde eine Kommunikations- und Sicherheitsarchitektur erstellt. Diese unterteilt sich in mehrere Komponenten, Kommunikationsschnittstellen und Sicherheitsdomänen. Bei der Konzeption wurde sehr stark auf Modularität, Flexibilität und Skalierbarkeit geachtet, so dass die Architektur später auch außerhalb des Projekts angewendet werden kann.

Das im Projekt betrachtete Optimierungsproblem ist verwandt mit dem klassischen Traveling Salesman Problem (TSP). Das TSP ist ein klassisches kombinatorisches Optimierungsproblem aus dem Bereich der theoretischen Informatik. Der wesentliche Unterschied zwischen dem klassischen TSP und dem im Projekt betrachteten Problem ist, dass der erste besuchte Ort nicht zwangsläufig deckungsgleich mit dem letzten besuchten Ort sein muss. Außerdem müssen für das im Projekt betrachtete Problem noch einige Nebenbedingungen wie Art und Anzahl der vom Zusteller betrachteten Pakete sowie die Lage möglicher Treffpunkte zwischen Zusteller und Zustellfahrzeug berücksichtigt werden. Aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse, welche im Rahmen einer studentischen Abschlussarbeit gründlich recherchiert wurden, zeigen, dass ein Maschinelles Lernverfahren namens „Pointer Network“ (PN) in Kombination mit verstärkendem Lernen verwendet werden kann, um TSPs zu lösen. Der Vorteil dieser Technik gegenüber exakten oder heuristischen Lösungsmethoden ist, dass ein PN Modell mit sehr wenig Zeitaufwand sehr gute Lösungen auch für verhältnismäßig große TSPs berechnen kann. Daher wurde diese Technik als sehr vielversprechend für den Einsatz im Projekt VanAssist identifiziert.

Um den Prozess der funktionalen Sicherheit in Bezug auf das Zielsystem zu initialisieren, wurden zunächst Anforderungen hinsichtlich der Einsatzumgebung identifiziert. Um diese Anforderungen strukturiert und ausreichend vollständig zu beschreiben, wurde hier auf das Vorgehen anhand der ISO26262:2018 (Funktionale Sicherheit für Kraftfahrzeuge) zurückgegriffen und eine entsprechende Item Definition erstellt, die die Operational Design Domain (ODD) spezifiziert. Die wesentliche Struktur ist in Abbildung 2 dargestellt.

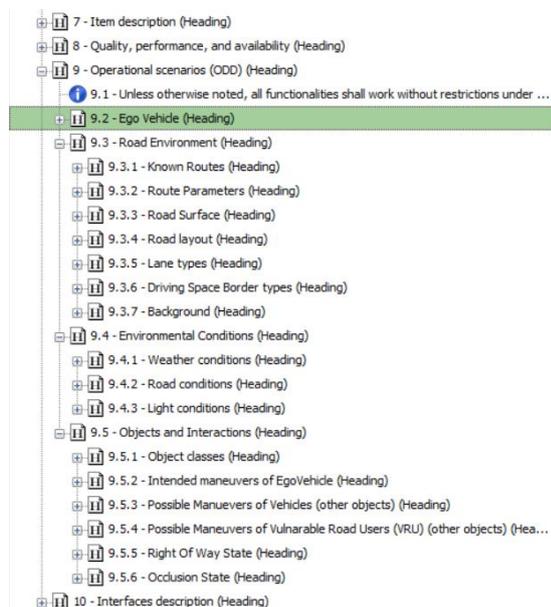


Abbildung 2: Struktur der Item Definition anhand ISO26262:2018.

Auf Grundlage der Hazard- und Risk-Assessment (HARA) der ISO26262:2018 wurden wesentliche Szenarien, Sicherheitsziele sowie Sicherheitskritikalitäts-Level (ASIL) identifiziert. Anhand der Auswirkung von Fehlverhalten des Systems lassen sich die resultierenden Szenarien in zwei Klassen unterteilen: den Comfort-Bereich und den Emergency-Brake Bereich.

Der Komfortbereich zeichnet sich dadurch aus, dass neben der maximal zulässigen positiven Beschleunigung und der zulässigen Lenkdynamik auch die maximal zulässige Verzögerung im Betrieb begrenzt werden. Durch diese Unterteilung haben falsch positiv ausgelöste Bremsmanöver keine Auswirkung auf die Sicherheit, da dem Ego-Fahrzeug folgende Verkehrsteilnehmer rechtzeitig auf das Ego-Fahrzeug reagieren können. Um eine entsprechende Limitierung der zulässigen Verzögerung zu identifizieren, wurde auf die FSR-ACC Norm ISO15622 zurückgegriffen, da die hierin aufgeführten Limitierungen für geschwindigkeitsabhängige Verzögerung und Ruck-Limitierung bereits im ausreichenden Maßstab validiert wurden.

Im Gegensatz zum Komfortbereich ist die Verzögerung im Emergency-Brake Bereich entsprechend nicht limitiert. Hierdurch kann auf unvorhersehbare Verkehrs-Szenarien sicher reagiert werden. Da durch die unlimitierte Verzögerung potenziell eine Gefährdung des rückwärtigen Verkehrs ausgelöst wird, gilt hier ein Safety Goal mit entsprechendem ASIL für die Vermeidung von False-Positive Auslösungen.

Durch die Aufteilung der Module in Komfort und Notbrems-Module kann von dem Wegfall von funktionalen Sicherheitsanforderungen im Komfortbereich profitiert werden. Zudem bieten sich unterschiedliche Lösungsansätze an, da im Notbrems-Bereich die zu planende Zeit durch das ausgeführte Bremsmanöver geringer ausfällt. Hierdurch können konservative Prädiktionen der Bewegung von Verkehrsteilnehmern eingesetzt werden, die die Sicherheit bei True-Positive Szenarien verbessern.

Die Notbrems-Funktionalität kann ebenso als eine Art Absicherung der nominalen Komfort-Funktion bzw. des im Forschungskontext immer vorhandenen Sicherheitsfahrers verstanden werden. Im Falle einer nicht erkannten Fehlfunktion der Komfort-Funktion, die zu einer Kollision führen würde, löst die Notbrems-Funktion aus. Da hierdurch allerdings nicht alle Sicherheitsziele erfüllt werden (Vermeidung von Fehlauflösungen, um rückwärtigen Verkehr nicht zu gefährden), darf dies jedoch nicht als vollständige Redundanz im Sinne einer ASIL-Dekomposition verstanden werden.

Um im Rahmen des Forschungsprojektes einen relevanten Subbereich des autonomen Fahrens zu fokussieren, wurde die Emergency-Brake Funktionalität primär für die Interaktion mit Fußgängern spezifiziert, entwickelt und getestet, da hier bereits in geringen Geschwindigkeitsbereichen eine signifikante Gefährdung identifiziert wurde.

Entsprechend der Sicherheitsziele und der relevanten Umgebungsbeschreibung wurden Anforderungen für die Notbrems-Funktionalität identifiziert. Diese beschreiben primär Anforderungen für die Erkennung von True-Positive Szenarien, die Vermeidung von False-Positive Auslösungen entsprechend den Einflussfaktoren aus der Item Definition sowie Performance Kriterien die Auslösezeit sowie Kinematik des Fahrzeuges beschreiben.

3.3 AP3 Hochgenaue Lokalisierung und hochauflösende Karten (IAV)

Die präzise Ortung des Ego-Fahrzeuges ist im Kontext des automatisierten Fahrens eine wesentliche Funktion zur Gewährleistung der Verfügbarkeit dieser Funktionen, insbesondere dann, wenn hochgenaue Karten der Fahrfunktion zugrunde liegen. Ein rein auf GNSS/IMU-Messungen basierendes Lokalisierungssystem genügt nicht den Ansprüchen an Zuverlässigkeit und Genauigkeit. Ein RTK-System (Real-Time Kinematic) ermöglicht zwar unter optimalen Bedingungen grundsätzlich Genauigkeiten im Dezimeter-Bereich, ist allerdings auch anfällig gegenüber Effekten wie Mehrwegeausbreitungen oder Abschattung. Aus diesem Grund ist es notwendig, weitere Sensoren in die Lokalisierungslösung einzubeziehen. Im Rahmen des Projektes verwendet **Ibeo** hierzu NEXT Solid-State LiDAR-Sensoren.

Zur Kombination der einzelnen Sensoren wird ein Partikelfilter verwendet. Als Input dienen GNSS-, IMU-, CAN-(Odometrie) und LiDAR-Messungen. Der Filter besteht aus einer Vielzahl an Partikeln, wobei jedes Partikel die Hypothese über den aktuellen Fahrzeugzustand (Position und Orientierung) bildet. Durch die aus den IMU- und CAN-Messungen gewonnenen Informationen über die Eigenbewegung des Fahrzeugs, kann der Zustand zu dem Zeitpunkt eines folgenden Update-Schritts prädiziert werden. In diesem Update-Schritt werden die einzelnen Partikel anhand der GNSS- und LiDAR Sensoren bewertet und gewichtet.

Für den Update-Schritt über LiDAR-Messungen werden semantische Features verwendet und mit entsprechenden Features verglichen, die in einer hochgenauen semantischen Karte eingetragen sind. Die Features können stangenförmige oder planare Objekte oder auch Fahrbahnmarkierungen sein. Stangen und planare Objekte können über ihre 3D-Form, Fahrbahnmarkierungen über Intensitätsunterschiede des reflektierten Laser-Signals detektiert werden. Für jedes Partikel mit einem unterschiedlichen Fahrzeugzustand ergibt sich auch eine unterschiedliche Position der detektierten Features. Anhand der Distanz der Features eines Partikels zu deren assoziierten Features aus der Referenzkarte können die Partikel anschließend gewichtet werden. Je geringer die Distanz, desto höher das Gewicht. Die GNSS-Messungen sind insbesondere für die Initialisierung der Partikel von Bedeutung, können aber auch fortlaufend zur Gewichtung der Partikel anhand der Distanz der GNSS-Position zu der Position der einzelnen Features verwendet werden.

Zuletzt findet ein sogenanntes Resampling statt, in dem aus der gesamten Partikelmenge neue Partikel anhand ihrer Gewichte gezogen werden. Partikel mit einem geringen Gewicht sterben somit aus, Partikel mit einem hohen Gewicht bleiben bestehen. Die resultierende Position und Orientierung des Fahrzeuges bilden sich aus dem Mittel aller Partikel.

Grundsätzlich ist der von **IAV** verwendete Ansatz ähnlich zu dem von Ibeo. Auch IAV verwendet Landmarken um sich innerhalb einer Karte zu lokalisieren.

A priori wurde das Testgebiet entsprechend kartographiert. Neben den zur Lokalisierung benötigten Landmarken enthält die Karte auch Straßen und Kreuzungen.

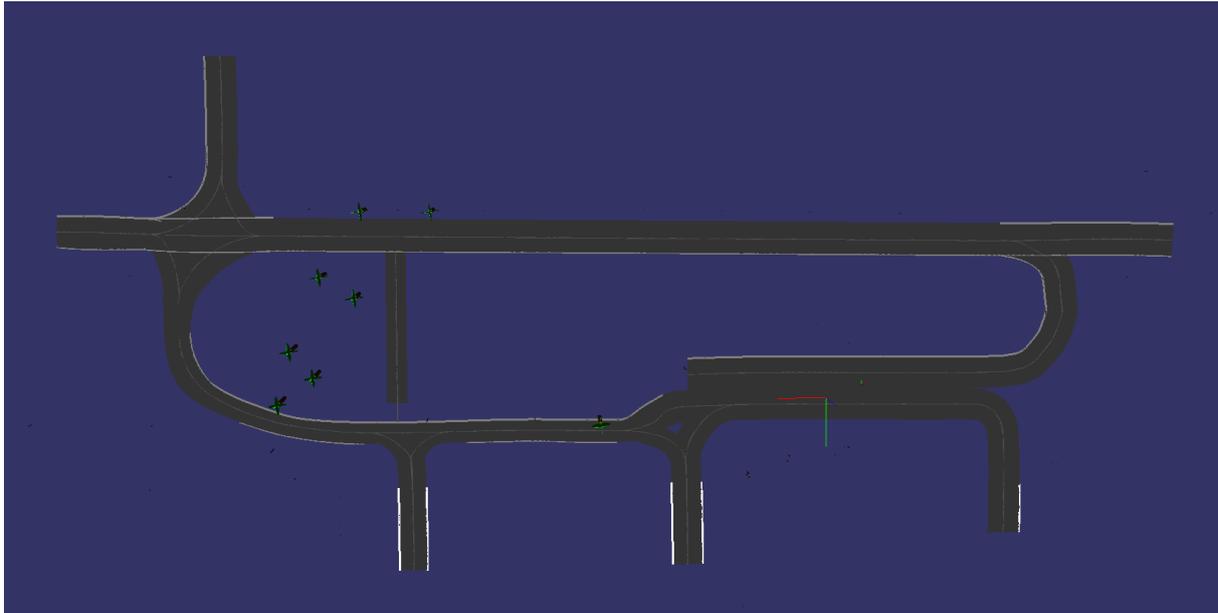


Abbildung 3: 3D Karte (IAV).

Im ersten Lokalisierungsschritt werden pfahlartige Strukturen wie Laternenmasten, Bäume, Masten von Schildern und ähnliche erkannt und nach Umfang, Höhe und Position vermessen. Aus diesen Informationen lässt sich die Position und Ausrichtung des Fahrzeugs bestimmen. Um das Ergebnis weiter zu verbessern, werden im nächsten Schritt Spurmarkierungen und Bordsteine hinzugenommen. Light Detection and Ranging (LiDAR) Sensoren werden zwar in erster Linie zum Messen von Entfernungen verwendet, können aber auch die Reflektivität von Oberflächen erfassen. In der dreidimensionalen Punktwolke wird für jeden Punkt nicht nur die Position festgehalten, sondern auch die Intensität, mit welcher dieser Punkt das Licht reflektiert hat. So heben sich die stärker reflektierenden Spurmarkierungen vom Untergrund ab. Insbesondere die vorher bestimmte Ausrichtung und die laterale Ablage wird mit Hilfe der detektierten Spurmarkierungen und Bordsteinen substanziell verbessert.

Neben den LiDAR Sensoren werden auch sogenannte AreaView Kameras verwendet. Für diese Kameras wurde im Projekt ein Neuronales Netz trainiert. Mit der im Fahrzeug verbauten NVIDIA Jetson AGX Xavier ist es möglich dieses Netz in Echtzeit einzusetzen. Somit konnte die Konfidenz für die Erkennung von Landmarken weiter gesteigert werden und die Lokalisierung wurde insgesamt robuster und zuverlässiger.

Die von IAV verwendeten LiDAR Sensoren rotieren mit 10Hz, also alle 100ms eine Umdrehung. Es ist möglich die Rotationsgeschwindigkeit zu erhöhen, jedoch arbeiten die Sensoren mit einer konstanten Anzahl von Punkten pro Minute. Die höhere Rotationsfrequenz würde in einer weniger dichten Punktwolke resultieren. Eine weniger dichte Punktwolke wirkt sich negativ auf die Erkennung von Landmarken aus. Um die Lokalisierungspositionen dennoch mit einer höheren Frequenz ausgeben zu können, werden die Radgeschwindigkeiten des Motionboards verwendet. Das Motionboard stellt die Radgeschwindigkeiten mit 100Hz zur Verfügung. Mit Hilfe eines holonomen Fahrzeugmodells kann so alle 10ms eine Lokalisierungsposition ausgegeben werden, obwohl die LiDAR Sensoren nur alle 100ms eine vollständige Punktwolke liefern.

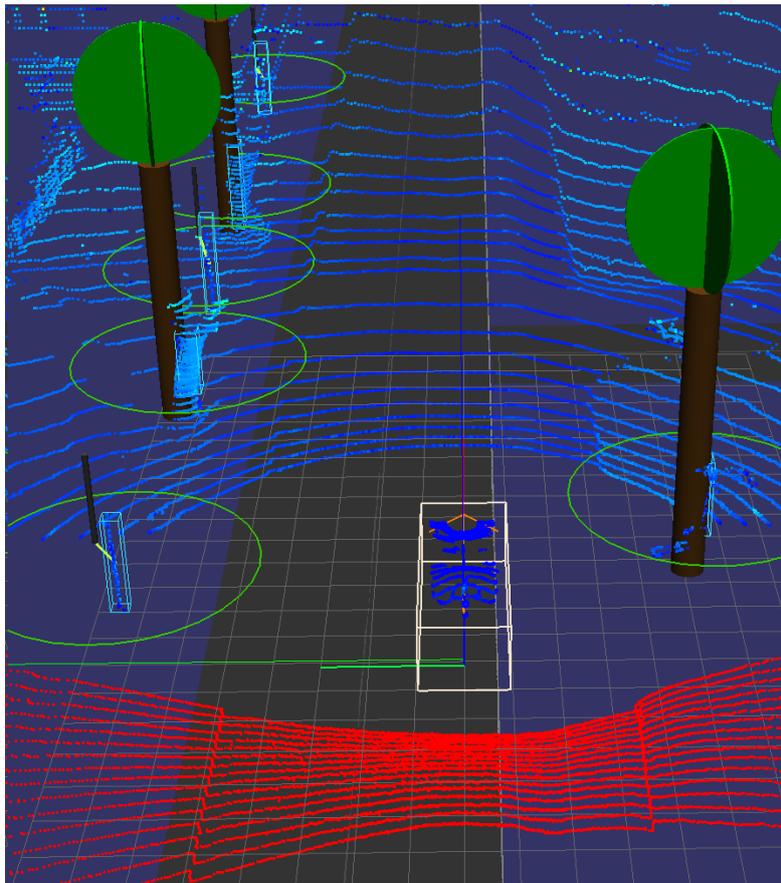


Abbildung 4: Lokalisierung IAV.

3.4 AP4 Fahrzeugsetup / -inbetriebnahme (IfF)

Innerhalb des AP4 war das **Institut für Fahrzeugtechnik der TU Braunschweig** für die Beschaffung und den Aufbau eines automatisierten Versuchsträgers verantwortlich.

Entsprechend den Ausführungen in AP2 wurde ein Motionboard der Hanseatischen Fahrzeug Manufaktur (HFM) beschafft. Bei Lieferung des Motionboards (vgl. Abbildung 5), welche Grundlage für den aufzubauenden Gesamtversuchsträger war, ergab sich eine Lieferverzögerung von ca. 3 Monaten, welche ihre Ursache in der Corona-Pandemie und damit verbundenen Lieferverzögerungen auf Seiten von Zulieferern hatte. Nach einer Schulung durch Mitarbeiter des Herstellers konnte zunächst der manuelle Fahrbetrieb realisiert werden.



Abbildung 5: HFM Motionboard im Anlieferungszustand.

Ergänzend zu der in AP2 erarbeiteten Architektur des automatisierten Versuchsträgers, wurde weiterhin ein Sicherheitskonzept für den prototypischen Versuchsträger entwickelt. Dies sieht zum einen eine funktionale Redundanz bzw. Absicherung vor, indem parallel zur automatisierten Fahrfunktion des IfF (siehe AP6) das Ibeo Safety System das aktuelle Fahrzeugverhalten sowie die Verkehrssituation überwacht und bei Bedarf priorisiert eingreifen kann. Für diese Priorisierung wird das vorgestellte CAN-Gateway eingesetzt. Aufgrund des prototypischen Anwendungsfalls und den Vorgaben des Fahrzeugherstellers wird zudem der Einsatz eines Sicherheitsfahrers notwendig, siehe Abbildung 6. Ergänzt wird dieses System über den sogenannten Dependability Cage bzw. durch den Leitstand der TU Clausthal, siehe AP7.

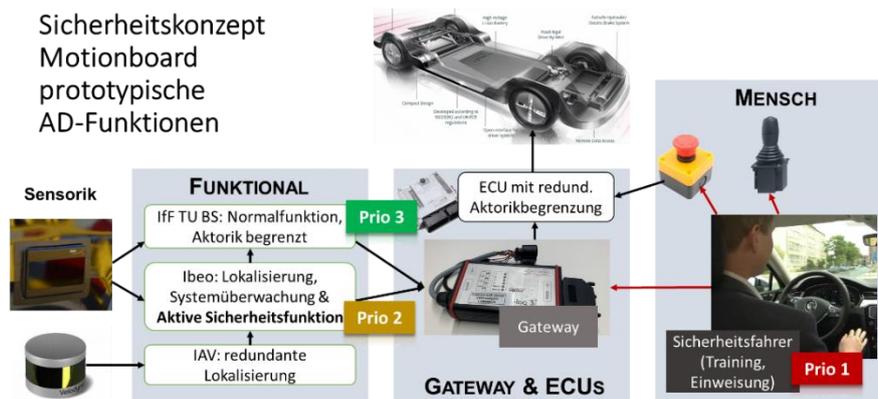


Abbildung 6: Sicherheitskonzept des Versuchsträgers.

Zur Vernetzung des Automatisierungssystems mit dem Motionboard wurde ein Workshop mit dem Hersteller HFM durchgeführt. Über eine definierte CAN-Schnittstelle ist es möglich, in den automatisierten Modus zu wechseln und dem Steuergerät des Motionboards gewünschte Stellbefehle für die Lenkung sowie eine Wunschbeschleunigung- oder Verzögerung und die gewünschte Fahrstufe vorzugeben, welche dann entsprechend umgesetzt werden. Die Schnittstelle wurde vollständig implementiert, wodurch es möglich ist, das Motionboard über das Automatisierungssystem zu steuern. Aus Sicherheitsgründen sieht der Hersteller eine manuelle Freigabe zur automatisierten Fahrt im Stillstand durch einen Taster vor, wodurch ein Sicherheitsfahrer – zusätzlich zu den bereits dargestellten Überlegungen – erforderlich wird.

Neben der eigentlichen Ertüchtigung zur Automatisierung, welche zuvor vorgestellt wurde, bedarf es auch der mechanischen und elektrisch/elektronischen Vorbereitung des

Versuchsträgers zur Aufnahme der Messtechnikkomponenten und eines Aufbaus zur Darstellung eines Logistikfahrzeugs.

Für letzteres ist zwingend eine weitere Aussteifung des Motionboards notwendig. Da aus Budgetgründen keine volltragende Karosserie entworfen werden konnte, entschied sich das Konsortium für eine geteilte Lösung: Ein auf das Motionboard aufgesetzter Zwischenrahmen dient zur Aussteifung und Aufnahme der weiteren Komponenten. Die Fahrzeughülle wurde vom generellen Konzept als eher konventioneller Aufbau ausgeführt, da im Rahmen der prototypischen Umsetzung stets ein Sicherheitsfahrer im Fahrzeug verbleiben muss und enthält somit eine typische Fahrerkabine. Die Messtechnik ist im Fahrzeugrumpf über der HV-Batterie untergebracht, sodass sich ein ebener Ladeboden ergibt und der restliche Teil des Fahrzeuges als Paketraum dienen kann.

Zunächst wurde die Umsetzung des versteifenden Zwischenrahmens, welcher darüber hinaus auch zur Aufnahme weiterer Module genutzt wurde, forciert. Hierbei wurde sich für einen modularen Aufbau aus Schweißbaugruppen und ITEM-Profilen entschieden und zusätzlich eine Unterkonstruktion für die Messtechnik entworfen. Weiterhin wurde der Zwischenrahmen zur Aufnahme der Laserscannersensorik genutzt. Nachdem seitens Ibeo das finale Scannersetup festgelegt wurde, konstruierte das IfF die entsprechenden Anbindungsbauteile für den Versuchsträger. Abbildung 7 zeigt den Versuchsträger PLUTO (Plattform for future urban modality and transport) mit Unterkonstruktion und Fahrerplatz, welcher so für die Aufnahme der Fahrzeughülle vorbereitet ist. Im vorderen Bereich wird die Halterung der Ibeo Laserscanner deutlich.



Abbildung 7: Versuchsträger PLUTO mit Unterkonstruktion und Laserscannern.

Ibeo stellte die Laserscannersensorik samt Powermanagement und Gateways bereit. Das System, welches zuvor bereits im Labor erfolgreich in Betrieb genommen wurde, konnte erfolgreich in den Fahrzeugversuchsträger integriert werden. Dies umfasste dabei sowohl die mechanische Integration der Laserscannersensorik in die von IfF gefertigten Halterungen an den vorgesehenen Verbaupositionen als auch die elektrisch/elektronische Implementierung im Versuchsträger. Letzteres sowie die Kalibrierung der Scanner wird in AP9 detaillierter dargestellt. Auf das gewählte Sensorsetup wird unten vertiefend eingegangen.

Die Fertigung der Fahrzeughülle bzw. des restlichen Aufbaus wurde durch DPD koordiniert. Die finale Montage erfolgte durch TUBS/IfF. Das Konzept der Fahrzeughülle sah einen modularen Aufbau bestehend aus einer Aluminium-Unterkonstruktion und der Design-Hülle (Mischverbund aus Aluminium und GFK) vor.

Der real gefertigte Aufbau wurde auf den in Abbildung 7 dargestellten Stand des Versuchsträgers montiert. Die restliche Sensorik (Kameras und Dachscanner), welche durch den Aufbau aufgenommen werden, wurden montiert und das Gesamtfahrzeug abschließend mit einer Folierung finalisiert. Das fertige Fahrzeug ist in Abbildung 8 dargestellt. Hier werden auch die Elemente des externalen HMI – bestehend aus einem Display und LED-Bändern in der Fahrzeugfront und -heck – ersichtlich.



Abbildung 8: Versuchsträger PLUTO mit Aufbau und HMI.

Seitens **Ibeo** wurden im AP4 verschiedene Sensorkonzepte untersucht, um eine Absicherung des Zustellfahrzeuges zu erreichen. Basierend auf den derzeit verfügbaren Ibeo Sensoren mit 60° horizontalem Sichtfeld, wurde ein Setup mit acht Sensoren gewählt, welche in Stoßstangenhöhe verbaut sind. Die Anbringung auf Höhe der Stoßstände ist wichtig, um auch kleine Objekte am oder direkt neben dem Fahrzeug detektieren zu können. Durch den begrenzten vertikalen Öffnungswinkel wäre dies bei Montage auf dem Dach nicht möglich.

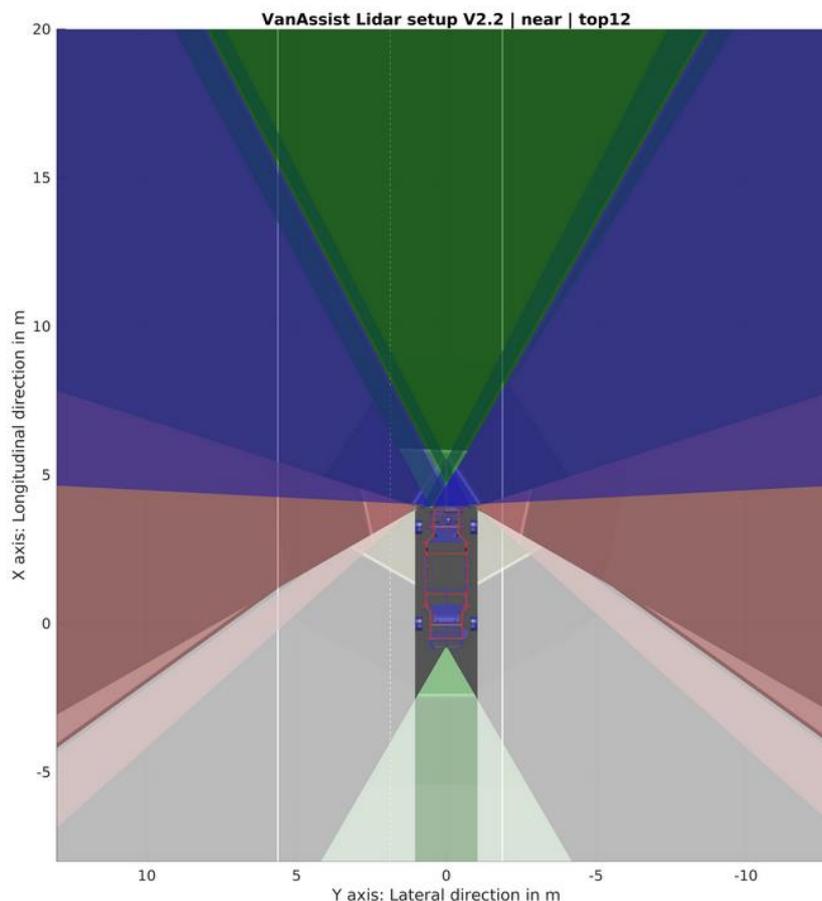


Abbildung 9: 360° Sensorsetup.

Abbildung 9 zeigt das Sensorsetup aus der Draufsicht: Front- und Hecksensoren sind in grün dargestellt. Der Frontsensor ist außermittig links montiert, um an vorausfahrenden Fahrzeugen vorbei den Gegenverkehr detektieren zu können. Durch eine Ausrichtung der beiden vorderen Sensoren (blau) über Kreuz können die toten Winkel vor dem Fahrzeug vermieden werden. Es ist insbesondere beim automatisierten Anfahren wichtig, sicherstellen zu können, dass sich vor dem Fahrzeug keine Personen befinden. Die seitlichen Sensoren (rot) werden genutzt, um an Kreuzungen querenden Verkehr zu detektieren. Die hinteren seitlichen Sensoren (weiß) decken den Bereich ab, der typischerweise als "toter Winkel" bezeichnet wird und insbesondere beim Spurwechsel beachtet werden muss.

Das gewählte Sensorsetup deckt so mit einer 360° Rundumsicht das gesamte Fahrzeugumfeld ab und legt damit den Grundstein für eine vollautonome Fahrfunktion. Das Sensorsetup eignet sich durch die 360° Abdeckung auch für eine featurebasierte Lokalisierung. Idealerweise wird dazu Sensorik auf dem Dach verbaut, damit andere Verkehrsteilnehmer nicht die Sensorsicht verdecken. Im Projekt konnte aber gezeigt werden, dass auch mit dem Setup auf Höhe der Stoßstange im VanAssist-Use-Case eine ausreichend genaue Lokalisierung erzielt werden kann.

Die beiden toten Winkel im Nahbereich am Heck des Fahrzeuges (siehe Abbildung 9) könnten zukünftig durch weitere, auf dem Dach verbaute Sensoren mit weitem Öffnungswinkel von 120° oder andere Sensortechnologien abgedeckt werden.

Für die Lokalisierung wurden von **IAV** zwei 360 Grad LiDAR Sensoren am Fahrzeug verbaut. Ein Sensor befindet sich mittig auf dem vorderen Dachbereich, der zweite Sensor am Heck des Fahrzeuges. Die Verbauposition auf dem Dach des Fahrzeuges wurde ausgewählt, um

Verdeckungen durch den direkten Verkehr im urbanen Raum zu vermeiden. Auch parkende Autos können die zur Lokalisierung benötigten Landmarken verdecken. Der hintere LiDAR wird zur Bordstein- und Spurmarkierungserkennung verwendet. Durch den stumpfen Winkel zur Fahrbahn werden die reflektierenden Fahrbahnmarkierungen besonders gut erkannt.

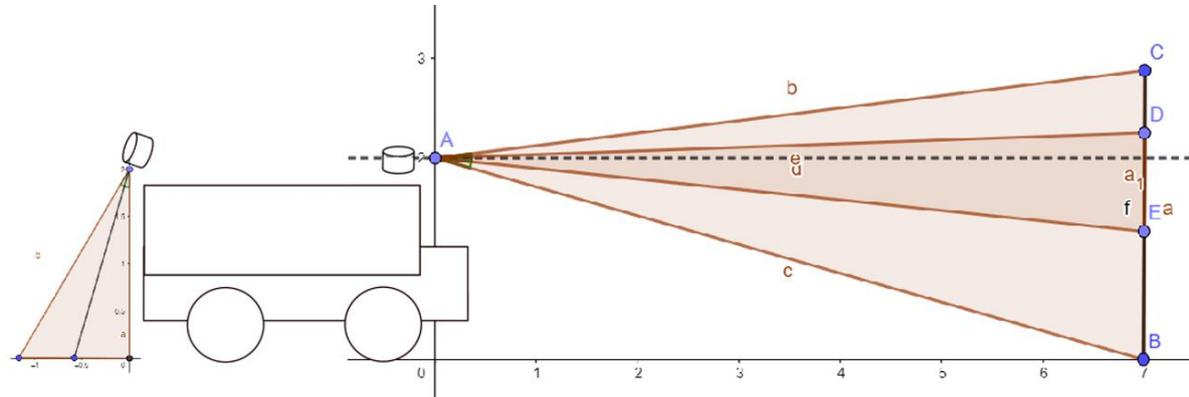


Abbildung 10: Verbauskizze LIDAR IAV.

Des Weiteren wurden vier AreaView Kameras am Fahrzeug verbaut. Diese Serienkameras zeichnen sich durch einen Öffnungswinkel von fast 180° aus.

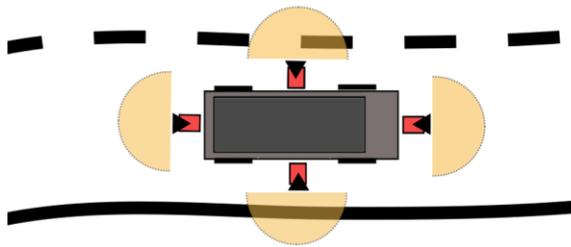


Abbildung 11: Verbauskizze AreaView Kameras IAV.

3.5 AP5 Kommunikation (HSO)

Für die Car2X-Kommunikation wurden mehrere Komponenten definiert. In AP5 entwickelte die **Hochschule Offenburg (HSO)**, die entsprechenden Bestandteile, die für jegliche Art der sicheren Kommunikation zwischen den Teilnehmern zuständig sind. Innerhalb dieses Arbeitspakets wurden hierfür zum einen die Kommunikationsplattformen in Form von Hardware mit Hilfe von Entwicklungsboards aufgebaut, zum anderen wurden die erforderlichen Software- und Firmware-Bestandteile umgesetzt. Abbildung 12 beispielsweise zeigt die aufgebauten Hardwareplattformen der sogenannten ComBoxen.

Um auf den ComBoxen die erforderlichen Kommunikationskanäle bereitstellen zu können, wurden existierende Entwicklungsplattformen genutzt und kombiniert:

- ein Raspberry Pi 3+² als Basisplattform
- ein 4G-Modul für die Primärkommunikation³
- auf Seiten der VBox ein LoRaWAN-Concentrator-Shield⁴
- auf Seiten der SBox ein LoRaWAN-Shield⁵

² https://de.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi#Hardware

³ <https://sixfab.com/product/raspberry-pi-3g-4glte-base-shield-v2/>

⁴ https://wiki.dragino.com/index.php?title=Lora/GPS_HAT

⁵ <https://www.antratek.de/10-channels-lorawan-gps-concentrator-for-raspberry-pi>

Zudem umfasst die Kommunikation auch Backend-Services, die u.a. für die Sicherheitsfunktionen und das Flotten- und Logistikmanagement zuständig sind. Diese Backendkomponenten werden durch Standard-PC und Server-Plattformen repräsentiert.

Aufgrund der gegenüber dem ursprünglichen Plan geänderten Systemarchitektur musste ein größerer Fokus als geplant auf die Kommunikationswege der Backend-Kommunikation und der Kommunikation mit dem Leitstand gelegt werden. Diese sind für die Interaktion der einzelnen Komponenten und somit für die Realisierung des VanAssist Use-Cases essenziell.

Zusammenfassend sind die Arbeiten innerhalb dieses Arbeitspakets fertig gestellt. Die folgenden Unterkapitel geben einen Überblick der getätigten Arbeiten.

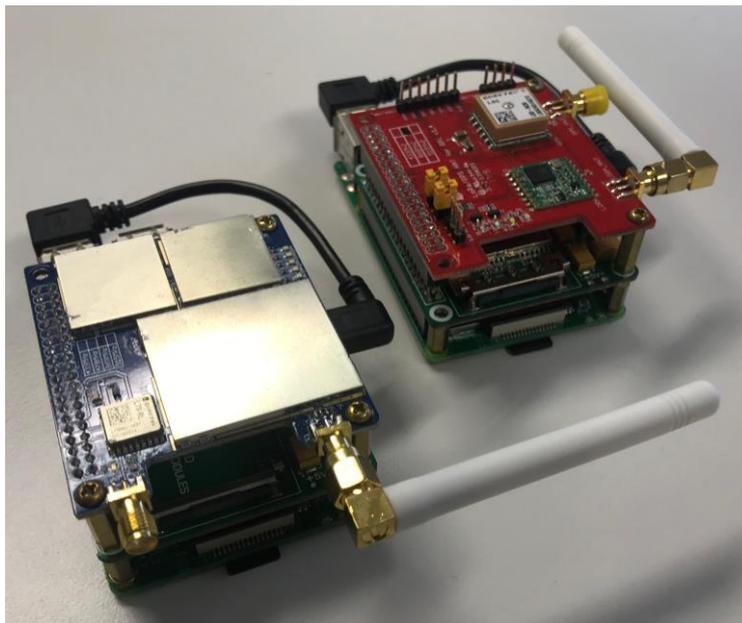


Abbildung 12: Hardwareaufbau der ComBoxen.

3.5.1 Definition der Kommunikations- und Sicherheitsarchitektur

Anhand der gegebenen Anforderungen wurde eine Kommunikations- und Sicherheitsarchitektur erstellt. Diese unterteilt sich in mehrere Komponenten, Kommunikationsschnittstellen und Sicherheitsdomänen. Bei der Konzeption wurde sehr stark auf Modularität, Flexibilität und Skalierbarkeit geachtet, so dass die Architektur später auch außerhalb des Projekts angewendet werden kann.

3.5.1.1 Komponenten

Die Gesamtarchitektur besteht aus verschiedenen Komponenten, deren Entwicklung teilweise auch von unterschiedlichen Partnern getrieben wurde:

Endpunkte – Der Zusteller und das Fahrzeug stellen die jeweiligen Endpunkte der Kommunikationskette dar. Dazwischen liegen weitere Komponenten, die in Form von Backend-Services umgesetzt werden.

ComBox – Sowohl das Fahrzeug als auch der Zusteller werden mit sogenannten ComBoxes ausgestattet, die die sichere und redundante Kommunikation abstrahieren. Die jeweiligen damit verbundenen Funktionen werden über vereinfachte Schnittstellen den Benutzern (Fahrzeug, Zusteller) zugänglich gemacht. Hier wird unterschieden zwischen der Zusteller-ComBox (auch Smartphone-ComBox oder SBox genannt) und der Fahrzeug-ComBox (auch VehicleBox oder VBox genannt).

Smartphone – Der Zusteller steuert seine Paketzustellungen mittels einer Smartphone-App, die von den Projektpartnern BridgingIT und Universität Mannheim/InES konzipiert und

entwickelt wurde. Hierzu wird eine sichere Bluetooth Low Energy (BLE) Verbindung zwischen den Teilnehmern aufgebaut.

Logistik-Zentrum – Das Logistik-Zentrum stellt ein für das Projekt vereinfachtes Abbild des DPD-Logistikzentrums dar. Hierin werden z.B. das User- und Paket-Management durchgeführt. Die Routen-Planung stellt die wichtigste Komponente für das Projekt im System dar und wird von der Universität Mannheim konzipiert und entwickelt.

Leitwarte – Die Leitwarte ist für die Steuerung und Überwachung der Fahrzeuge zuständig. Alle Fahrzeug-Befehle, die die Zusteller über die Primärkommunikation absetzen, werden über die Leitwarte zu dem jeweiligen Fahrzeug weitergeleitet. Die Leitwarte bildet zusammen mit dem Logistik-Zentrum das Backend.

Fahrzeug – Das Fahrzeug selbst besteht aus mehreren Teilkomponenten, die zum einen für die Kommunikation mit der ComBox, zum anderen aber auch für die Steuerung der autonomen Fahrfunktionen zuständig sind.

3.5.1.2 Kommunikationskanäle

Um eine redundante Kommunikation aufzubauen, wurden zwei Kommunikationskanäle definiert, eine Primär- und eine Sekundärkommunikation. Die Primärkommunikation wird dabei als Hauptmedium genutzt, während die Sekundärkommunikation der Ausfallsicherheit dient und nur Teilfunktionalitäten der Primärkommunikation bereitstellt.

Die Primärkommunikation wird über eine Mobilfunkanbindung (derzeit 4G, in Zukunft 5G) abgebildet. Hierüber können alle Befehle und Abfragen zwischen den Komponenten ausgetauscht werden.

Die Sekundärkommunikation wird ausschließlich als Notfall-Kommunikationsmedium genutzt, die aktiv wird, wenn die Primärkommunikation ausfällt, (z.B. kein Mobilfunkempfang). Die Sekundärkommunikation setzt hierbei auf der LoRa-Technologie⁶ auf. Dadurch wird eine Kommunikation mit hoher Reichweite und ohne Abhängigkeiten zu Netzwerk-Infrastrukturen von Drittanbietern o.ä. gewährleistet.

3.5.1.3 Sicherheitsarchitektur

Die für das Projekt konzipierte Sicherheitsarchitektur wurde so gewählt, dass sie existierende Sicherheitsmechanismen und Verschlüsselungsmethoden nach dem aktuellen Stand der Technik nutzt. Als Grundlage für die abgesicherte Kommunikation, sowohl auf der Primär- als auch auf der Sekundärkommunikation, wurde eine Kombination des Transport-Layer-Security (TLS) Protokolls⁷ zusammen mit der Nutzung von Authentifizierungstokens⁸ gewählt.

Um in der Anwendung der Sicherheitsarchitektur und des Systems ausreichend flexibel sein zu können, wurde die Sicherheitsarchitektur in drei Domänen unterteilt, die sich um die Verschlüsselung und die Authentifizierung mit digitalen Zertifikaten kümmern:

- Die Logistik-Zentrum-Domäne wird vom Paketdienstleister (hier DPD) kontrolliert (in Abbildung 13 als rote Domäne dargestellt). Die Leitwarte ist ebenfalls Teil dieser Domäne, so dass ein Paketdienstleister einen Leitwarten-Service bei sich einbinden kann.
- Die Leitwarte bildet eine separate Sicherheitsdomäne (in Abbildung 13 als orangene Domäne dargestellt). Somit kann die Leitwarte als Dienstleistung fungieren.
- Die ComBoxes sind ebenfalls Bestandteil der Sicherheitsdomäne der Leitwarte. Somit kann die Leitwarte ComBoxes in ihre Domäne mit aufnehmen und so deren Teilnahme im System steuern.

⁶ "LoRa Technology overview", Semtech, <https://www.semtech.com/lora>, zuletzt besucht 29.01.2020

⁷ "The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.2 – RFC5246", IETF, <https://tools.ietf.org/html/rfc5246>, zuletzt besucht 29.01.2020

⁸ "JSON Web Token (JWT) – RFC7519", IETF, <https://tools.ietf.org/html/rfc7519>, zuletzt besucht 29.01.2020

- Im Fahrzeug selbst existiert eine dritte weitere Domäne. So kann z.B. eine ComBox in ein Fahrzeug verbaut und damit gekoppelt werden. So kann einem Missbrauch (z.B. durch Einbau einer manipulierten ComBox) vorgebeugt werden.

Bei Nutzung der Primärkommunikation werden zwischen den jeweiligen Teilnehmern jeweils TLS-Verbindungen aufgebaut. Je nach Verbindung unterscheiden sich allerdings die Authentifizierungsregeln, so dass die Sicherheit zwar gegeben ist, aber keine direkte Abhängigkeit zwischen allen Komponenten besteht. Dies wird u.a. auch durch den Einsatz von Authentifizierungstokens erreicht.

Für die Sekundärkommunikation werden die im Standard definierten LoRaWAN Sicherheitsfunktionen nach dem Prinzip der Activation by Personalization (ABP) verwendet. Dies bedeutet, dass die Schlüsselinformationen für den Sekundärkanal zuvor über den sicheren Primärkanal ausgetauscht werden müssen.

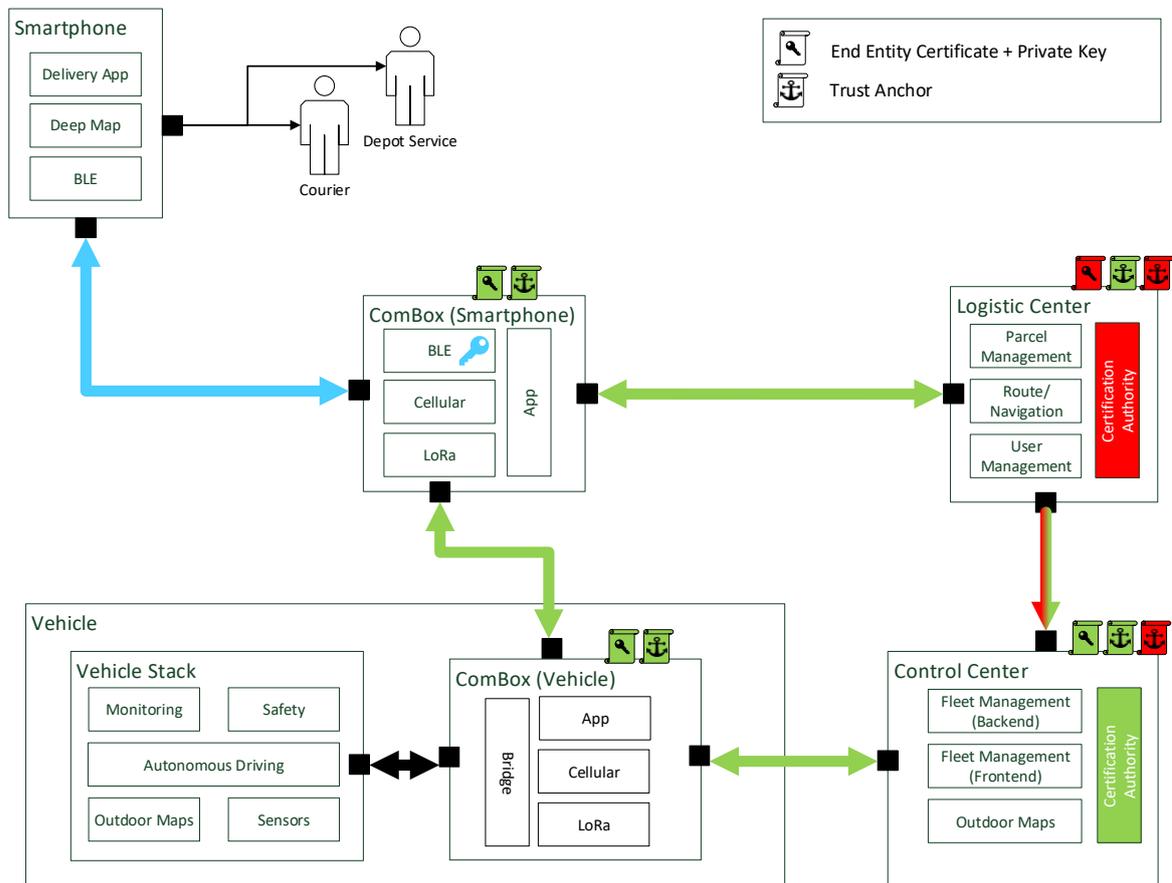


Abbildung 13: Darstellung der Kommunikations- und Sicherheitsarchitektur.

3.5.2 Kommunikation zwischen Zustellfahrzeug und Verkehrsteilnehmer

Seitens der Hochschule Offenburg wurden Konzepte für die Kommunikation des Zustellfahrzeugs mit anderen Verkehrsteilnehmern entwickelt. Diese berücksichtigen die Einbindung anderer Verkehrsteilnehmer wie z.B. unbewegliche Infrastrukturobjekte wie Ampeln, oder Ladestationen. Prinzipiell können die möglichen Kommunikations-Partner in zwei Gruppen unterteilt werden:

- Verkehrsteilnehmer im Depot (intern)
- und Verkehrsteilnehmer außerhalb des Depots (extern).

Als interne Kommunikationspartner und damit verbundenen Funktionen sind folgende Erweiterungen möglich:

- Schranken/Rolltore: Schranken und Rolltore können ihren Status übertragen. Somit kann das Fahrzeug direkt erkennen, ob ein Weg passiert werden kann, ohne die Information indirekt, d.h. über Umwege vom Backend zu erhalten.
- Kommunikation mit anderen Fahrzeugen im Depot: Durch den Austausch von Positionsdaten und Metainformationen kann das Fahrzeug die Verkehrsdichte im Depot erkennen.
- Ladesäulen: Ladesäulen können ihren Zustand (frei, belegt) sowie weitere Informationen (z.B. Position) übertragen, so dass ein Fahrzeug sich selbst einen Ladepunkt auswählen kann. Auch hier kann somit ein zusätzlicher Umweg über das Backend vermieden werden. Gleichzeitig können Ladesäulen auch „reserviert werden“, um eine mögliche Doppelbelegung zu vermeiden.

Die externen Kommunikationspartner umfassen neben den Infrastrukturelementen zur Verkehrsregelung, wie Ampeln, z.B.:

- Öffentliche Ladesäulen,
- möglich Haltebuchten sowie Metainformationen (z.B. Größe), so dass das Zustellfahrzeug eine Auswahl an Haltemöglichkeiten erhält, an denen es auf den Zusteller warten kann.

3.5.3 Kommunikation zwischen Zustellfahrzeug und Zusteller

In diesem Arbeitspaket wurden seitens der Hochschule Offenburg mehrere Punkte umgesetzt, die in den folgenden Unterkapiteln kurz erläutert sind.

3.5.3.1 Primärkommunikation

Für die Primärkommunikation wurden innerhalb des TAP5.1 die entsprechenden Dienste sowohl auf der VBox als auch auf der SBox vollständig umgesetzt. Beim Systemstart bauen beide Komponenten selbstständig eine Verbindung zu den jeweiligen Backend-Services auf. Anschließend sind sie dem System nach einer sicheren Authentifizierung bekannt und können dort zugeordnet werden.

Ist eine Zuordnung erfolgt (z.B. Zusteller zu Fahrzeug), können Befehle zwischen den Kommunikationspartnern ausgetauscht werden. Während bei den ersten Tests die Kommunikation über lokale Netzwerke (LAN/WLAN) abgewickelt und wurde, konnte die Primärkommunikation im Laufe des Projekts erfolgreich an das Mobilfunknetz angebunden werden. Da aber die Basisprotokolle, auf der IP-Technologie basieren, erfolgte dieser Integrationsschritt nahezu nahtlos. Die Umsetzung der Primärkommunikation erforderte mehrere Schritte:

- Implementierung der VBox und SBox Services zusammen mit einer REST-Schnittstelle nach außen, um die Funktionen verfügbar zu machen. Diese Services wurden unter Nutzung von NodeJS realisiert.
- Entwicklung und Integration der jeweiligen gerätespezifischen Applikationen der SBox und VBox.
- Entwicklung und Integration der Softwarebestandteile zur Anbindung der Geräte an die jeweiligen Backend-Services.
- Integration und Ansteuerung der Mobilfunkkommunikation.
- Zudem wurde ein separates VPN (Virtual Private Network) aufgebaut, in dem nun alle Komponenten miteinander kommunizieren.

3.5.3.2 Sekundärkommunikation

Für die Sekundärkommunikation wurden die erforderlichen Softwarebestandteile sowohl für die Fahrzeug-ComBox als auch für die Zusteller-ComBox umgesetzt, so dass die Kommunikation zwischen einer SBox und einer VBox über LoRaWAN als Sekundärschnittstelle aufgebaut wird, sobald durch das Backend eine Zuordnung vorgenommen wurde. Die benötigten Befehle und Abfragen können nach dieser Zuordnung ausgetauscht werden.

Die Basis hierfür bildet die Kombination aus mehreren Softwaremodulen, die zum Teil bereits existierten und für das Projekt entsprechend angepasst und/oder erweitert wurden, und zum Teil aus Eigenentwicklungen.

Die SBox weist hierbei eine einfachere Architektur auf als die VBox, was der zugrundeliegenden LoRaWAN Architektur⁹ geschuldet ist. Im Hinblick auf die SBox besteht die Architektur der Sekundärkommunikation hauptsächlich aus

- der sogenannten VACom Kommunikationsimplementierung, Diese wurde für das Projekt eigens entwickelt und bildet die benötigte Funktionalität über ein ressourcensparendes Protokoll ab.
- einer LoRaWAN Bibliothek. Diese wurde für das Projekt entsprechend angepasst und erweitert, z.B. um das VACom Protokoll zu unterstützen.
- den Treibern zur Ansteuerung des LoRa-Transceivers.

Die Fahrzeug-ComBox weist eine deutlich komplexere Architektur auf, was ebenfalls aufgrund der generellen LoRaWAN-Architektur gegeben ist. Hier kommen die folgenden Bestandteile zum Einsatz, die überwiegend aus dem sogenannten ChirpStack¹⁰ stammen:

- An unterster Stelle liegt das LoRa-Gateway. Es nimmt Pakete von der Hardware und leitet diese unangetastet an eine Gateway Bridge weiter. Ebenso ist das Gateway dafür zuständig, Pakete der höheren Schichten zu versenden. Das Gateway dient somit als Schnittstelle zwischen Hardware und Software.
- Die Gateway Bridge nimmt Pakete vom Gateway entgegen und leitet Pakete von höheren Schichten an dieses weiter. Dazwischen werden die Pakete in das jeweilige Format gebracht, so dass sie von den jeweiligen angrenzenden Komponenten verarbeitet werden können.
- In nächster Instanz steht ein sogenannter Network Server. Dieser ist u.a. für die Behandlung des LoraWAN Protokolls und für die Anwendung der Sicherheitsfeatures zuständig.
- Als oberste Instanz wird ein Application Server eingesetzt. Hier wird allerdings nicht der vom ChirpStack verwendete Application Server genutzt, sondern eine eigene Implementierung, die wiederum das VACom Protokoll implementiert, so dass hier letztendlich die Kommunikation mit dem Zusteller stattfindet.

⁹ "LoRaWAN - What is it? A Technical overview of LoRa and LoraWAN", LoRa Alliance, November 2015, https://docs.wixstatic.com/ugd/eccc1a_ed71ea1cd969417493c74e4a13c55685.pdf, zuletzt besucht 29.01.2020

¹⁰ <https://www.chirpstack.io/>

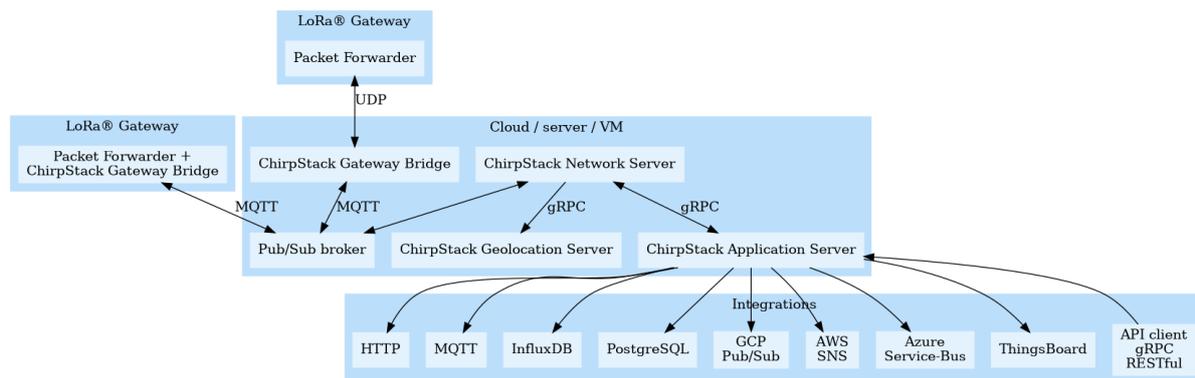


Abbildung 14: Architektur des ChirpStacks auf der Fahrzeug-ComBox.¹¹

Um eine flexible Lösung bereit zu stellen, wurde die Sekundärkommunikation zudem um Konfigurationsschnittstellen erweitert. Durch diese ist es möglich, zur Laufzeit Systemparameter zu ändern. Hierzu zählen z.B. der Austausch der Sicherheitsinformationen und die Zuordnung zwischen Fahrzeug und Zusteller. Um dies zu ermöglichen, wurde auf der Seite der Fahrzeug-ComBox (VBox) die Konfigurations-API des eingesetzten Network-Servers implementiert und integriert. In der Zusteller-ComBox (SBox) werden diese Informationen direkt in der Firmware verarbeitet, da hier keine zusätzlichen Komponenten zum Einsatz kommen.

3.5.3.3 Kommunikation mit der Smartphone App

Der Zusteller muss über sein Smartphone mit dem System kommunizieren können und ständig in Kontakt bleiben. Eine Anbindung eines Smartphones in das VanAssist Netzwerk wird über die Anbindung der SBox realisiert.

Als Schnittstelle zwischen der Smartphone-App, die der Zusteller zur Steuerung des Systems nutzt, und der SBox wurde dafür detaillierte Spezifikation erstellt. Die Basis-Kommunikation wird hier über Bluetooth Low Energy (BLE) aufgebaut und die VanAssist spezifischen Funktionen über des Bluetooth Generic Attribute Profile (GATT) abgebildet, welches eine standardisierte Zugriffsmethode über Bluetooth Geräte erlaubt. Einen kurzen Ausschnitt dieser Spezifikation zeigt Abbildung 15.

Die entsprechenden BLE-Dienste wurden entsprechend der Spezifikation auf der SBox implementiert. Die Basis bildet hier der NodeJS- und Linux-basierte BLE-Stack bleno¹². Dieser wurde sukzessive erweitert, um die in VanAssist benötigten Funktionalitäten abzubilden:

- Es mussten die Attribute entsprechend der Spezifikation aufgebaut werden.
- Die Attribute mussten mit den entsprechenden Funktionalitäten verknüpft werden. Jedes der Attribute wird durch eine eindeutige Kennung identifiziert, über welche es angesprochen werden kann bzw. über welche es Informationen liefert.
- Es musste ein entsprechendes Kommunikationsparadigma erstellt werden. BLE definiert unterschiedliche Zugriffsmechanismen auf die Attribute. Neben einfachen Schreib-Lesezugriffen ist es z.B. auch möglich, Werteänderungen über sogenannte Notifications direkt mitzuteilen. Hier wurden die Methoden entsprechend konzipiert und umgesetzt.
- Es musste eine softwareseitige Anknüpfung zur VanAssist Kommunikation geschaffen werden, so dass eine nahtlose Verbindung zu den VanAssist Services im Backend und im Fahrzeug entstand.

¹¹ <https://www.chirpstack.io/overview/architecture/>

¹² <https://github.com/noble/bleno>



 VanAssist

6.1.2 DIS (Device Information Service)

Characteristic	16Bit-UUID	Description	Access Type	Data Type	Value
Manufacturer Name String	0x2A29	The value of this characteristic is a UTF-8 string representing the name of the manufacturer of the device.	Read	UInt8[]	20 Bytes ¹ Example: 'ivESK'
Model Number String	0x2A24	The value of this characteristic is a UTF-8 string representing the model number assigned by the device vendor.	Read	UInt8[]	20 Bytes ¹ Example: 'VanAssist-ComBox'
Serial Number String	0x2A25	The value of this characteristic is a variable-length UTF-8 string representing the serial number for a particular instance of the device.	Read	UInt8[]	20 Bytes ¹ Example: '123-4567-89'
Hardware Revision String	0x2A27	The value of this characteristic is a UTF-8 string representing the hardware revision for the hardware within the device.	Read	UInt8[]	20 Bytes ¹ Example: 'Rev.1.0'
Firmware Revision String	0x2A26	The value of this characteristic is a UTF-8 string representing the firmware revision for the firmware within the device.	Read	UInt8[]	20 Bytes ¹ Example: 'V1.1'

Table 3: Characteristic of the DIS Service

6.2 Vendor-specific Services and Characteristics

The VanAssist application requires a set of vendor-specific services and characteristics that are not standardized by the BLE specifications. A device that wants to communicate with the ComBox shall implement the services and characteristics as defined in the following tables. The complete 128Bit-UUID for the vendor-specific services is 0000-0000-0000-1000-8000-00805F9B34FB; Byte 12 and 13 to be replaced by the 16 Bit UUID of the needed service or characteristic.

¹ This is the maximum possible length for this string.

ComBox BLE Specification, Dokument
Seite 12 von 26

Abbildung 15: Ausschnitt aus der ComBox BLE Spezifikation.¹³

3.5.4 Sicherheitsfunktionen in der Kommunikation

Die Sicherheitsfunktionen wurden vollständig gemäß der im Arbeitspaket 2 erstellten Spezifikation umgesetzt. Die Architektur besteht aus verschiedenen Sicherheitsdomänen, die den Benutzerdomänen entsprechen. Hierdurch lässt sich das System nahtlos in andere Anwendungsfälle einfügen. Die Trennung in verschiedene Sicherheitsdomänen ermöglicht es, dass die Benutzer (z.B. das Logistikzentrum) ihre eigene Sicherheitsdomäne haben, während das Flottenmanagement selbst innerhalb einer anderen Sicherheitsdomäne agiert. Der Sicherheitsbezug zwischen den Entitäten kann durch eine geschickte Kombination von sogenannten Vertrauensankern und privaten Geheimnissen, die zwischen den Komponenten ausgetauscht werden müssen, sowie durch die Verwendung von dynamischen Sicherheits-Tokens hergestellt werden. Ein Vertrauensanker ist ein etablierter Punkt des Vertrauens (normalerweise basierend auf der Autorität einer Person, eines Amtes oder einer Organisation), von dem aus ein Zertifikatsnutzer die Validierung eines Zertifizierungspfades beginnt.

Um einen großen Aufwand beim Einrichten oder Ändern/Erweitern eines Systems zu vermeiden, erfordert der vorgestellte Ansatz nur, dass die Hauptkomponenten des Benutzers und der Flotten-Domäne (in unserem Anwendungsfall das Logistikzentrum und die Leitwarte) beim Einrichten Sicherheitsinformationen austauschen. Es ist nicht erforderlich, dass jede Komponente die Sicherheitsinformationen der Komponenten der anderen Domänen kennt (z.B. benötigt jede ComBox Sicherheitsinformationen vom Control Center).

Abbildung 16 bis Abbildung 18 zeigen einige Abläufe der Authentifizierung zwischen verschiedenen Komponenten.

¹³ <https://www.chirpstack.io/overview/architecture/>

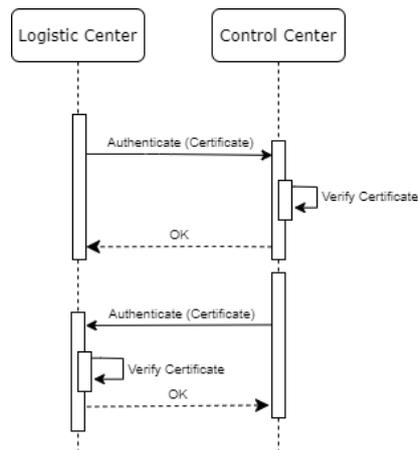


Abbildung 16: Authentifizierungsprozess zwischen der Leitwarte und dem Logistikzentrum.

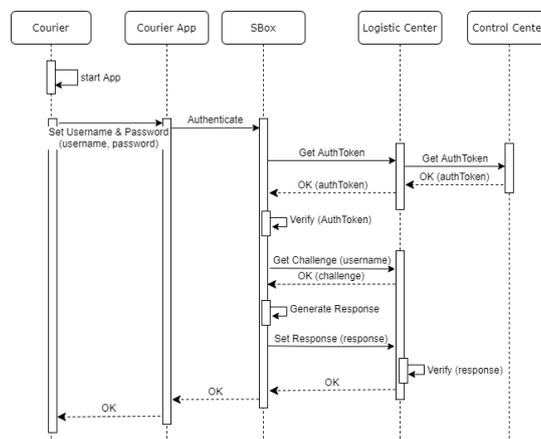


Abbildung 17: Authentifizierungsprozess zwischen SBox und Logistikzentrum.

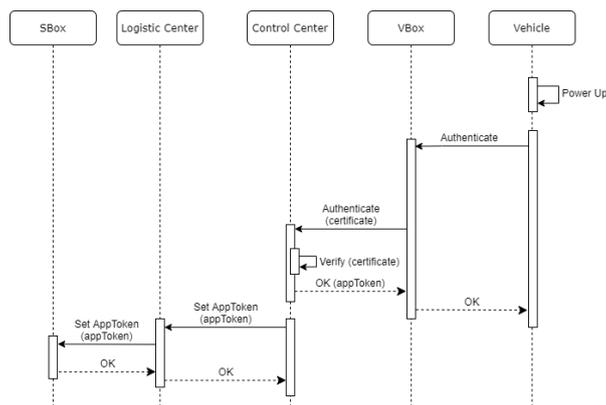


Abbildung 18: Authentifizierungsprozess zwischen VBox und Logistikzentrum.

3.5.5 Kommunikation mit dem Leitstand

Aufgrund der gewählten Systemarchitektur besteht der Leitstand aus mehreren Komponenten, wobei die beiden größten durch das Logistikzentrum und die Leitwarte dargestellt werden. So wird neben der Kommunikation mit der Leitwarte auch eine Kommunikation mit dem Logistikzentrum benötigt (zumindest seitens des Zustellers).

Innerhalb des Arbeitspakets wurden hierfür die Bestandteile der dafür benötigten Dienste auf den jeweiligen Teilkomponenten umgesetzt. Es wurden jeweils Dienste umgesetzt für:

- die SBox und VBox (siehe Kapitel 3.5.1)
- das Logistikzentrum
- die Leitwarte

3.5.5.1 Bediener Schnittstelle

Die von außen für den Bediener (Zusteller, Depot-Mitarbeiter etc.) zugänglichen Dienste wurden in Form von REST Services definiert und umgesetzt. Dem Bediener (Depot-Mitarbeiter/Zusteller) steht somit über die SBox ein fest definierter Satz an Kommandos zur Verfügung, über die er z.B. Befehle an das Fahrzeug schicken kann. Dies beinhaltet u.A.:

- die Steuerung des Zustands im Ablaufplan (z.B. Fahrzeug wird beladen),
- die Ansteuerung des Fahrzeugs, so dass dieses an eine bestimmte Position fährt,
- die Steuerung des Fahrzeug-Zustands (z.B. Türsteuerung),
- usw.

Im Gegenzug wird die Bediener-Schnittstelle dazu verwendet, dem Nutzer Informationen und Statusmeldungen zukommen zu lassen, wie z.B.:

- die aktuelle Position und der Zustand des Fahrzeugs,
- Fehlermeldungen für den Fall, dass das Fahrzeug seine autonome Fahrt nicht fortsetzen kann.

3.5.5.2 Control Center Connector

Die Hochschule Offenburg hat innerhalb dieses Arbeitspakets einen sogenannten Control-Center-Connector definiert und entwickelt, der als Bindeglied dient zwischen

- dem Fahrzeug und der Leitwarte,
- dem Logistikzentrum und der Leitwarte.

Die Bestandteile der Hochschule Offenburg nehmen somit im Wesentlichen die Funktion eines Vermittlers ein, während die Bestandteile der TU Clausthal die eigentliche Funktionalität der Leitwarte (Control Center) beinhaltet. Diese Vermittler stellt insgesamt vier Schnittstellen bereit:

- eine REST Schnittstelle, um Informationen von dem Logistikzentrum zu empfangen und diese mit Informationen zu versorgen,
- eine REST Schnittstelle zum Control Center, über die die Befehle vom Logistikzentrum weitergegeben werden,
- eine REST Schnittstelle, über die mit dem Fahrzeug kommuniziert wird,
- eine ROS Schnittstelle, um Befehle und Informationen zwischen dem Control Center und dem Fahrzeug zu vermitteln.

Die ROS Schnittstelle wurde entsprechend implementiert, damit das Control Center unabhängig von der Implementierung der Hochschule Offenburg bleibt und somit separat getestet werden kann. Dadurch ist es möglich, die Interaktionen zwischen Leitstand und Fahrzeug auch lokal und ohne die Kommunikationsbestandteile der Hochschule Offenburg zu nutzen. Im laufenden Betrieb fungiert der Control-Center-Connector dann als transparenter Übersetzer, so dass das Control Center nahtlos angebunden wird.

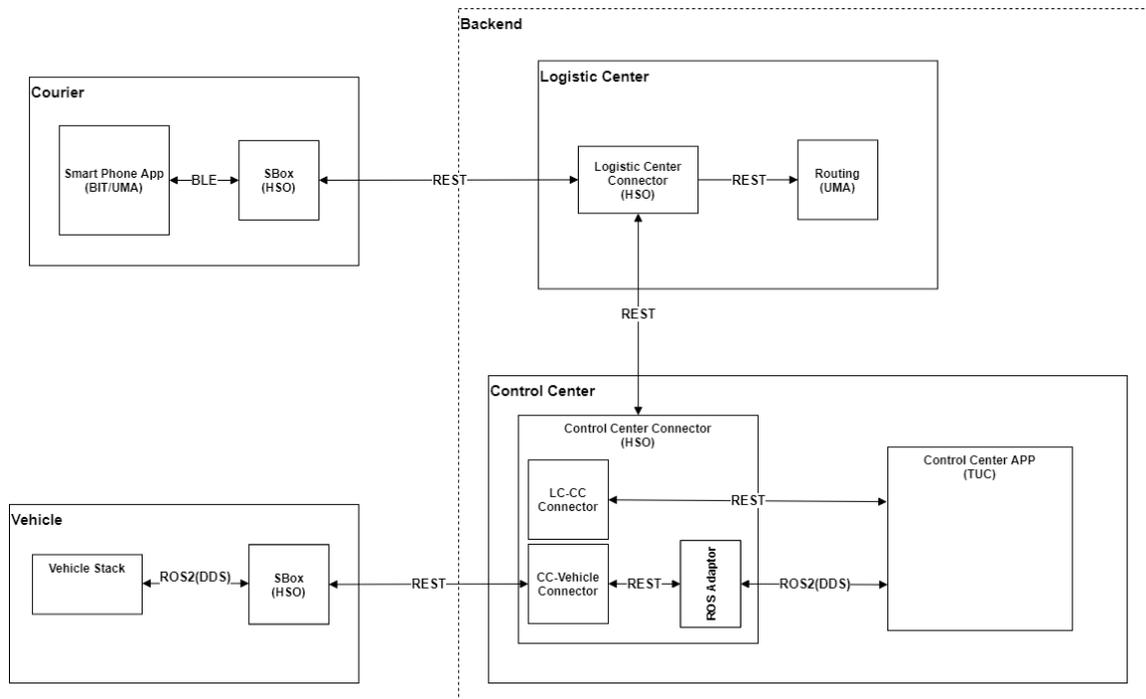


Abbildung 19: Darstellung der Kommunikationsprotokolle in der Netzwerkarchitektur.

3.5.5.3 Map-Server

Zusammen mit dem Partner IAV wurde seitens der Hochschule Offenburg eine Kommunikation zwischen dem Fahrzeug und dem Map-Server erstellt. Dieser Kommunikation ermöglicht ein Update der auf dem Fahrzeug vorhandenen Kartendaten über die entwickelte Kommunikationskette. Hierzu erhält der Map-Server kontinuierlich Status- und Positions-Informationen vom Fahrzeug, so dass rechtzeitig Kartendaten aktualisiert werden können, wenn z.B. in ein anderes Gebiet gewechselt wird, oder aktualisierte Karten vorliegen.

3.6 AP6 Automatisierte Fahrfunktionen (IBEO)

Das Institut für Fahrzeugtechnik (IfF) war im Projekt VanAssist verantwortlich für die Entwicklung der automatisierten „Komfort“-Fahrfunktion, welche während des normalen Fahrens, also in nicht sicherheitskritischer Situation, agiert.

Aufbauend auf der in AP4 dargestellten Hardware-Architektur des automatisierten Fahrsystems bzw. dem zum automatisierten Fahren ertüchtigten Versuchsträger, erfolgte die Entwicklung der Funktionalitäten. Folgend wird zunächst der generelle Aufbau der Fahrfunktion dargestellt. Daran anschließend knüpft sich die detaillierte Darstellung einzelner relevanter Teilalgorithmen, welche maßgeblich zur Bewältigung der vorliegenden Use-Cases entwickelt wurden.

Am IfF wurde eine übergeordnete hoch-modulare Funktionsarchitektur für die automatisierte Fahrfunktion entwickelt, welche in Abbildung 20 dargestellt ist und folgend erläutert wird.

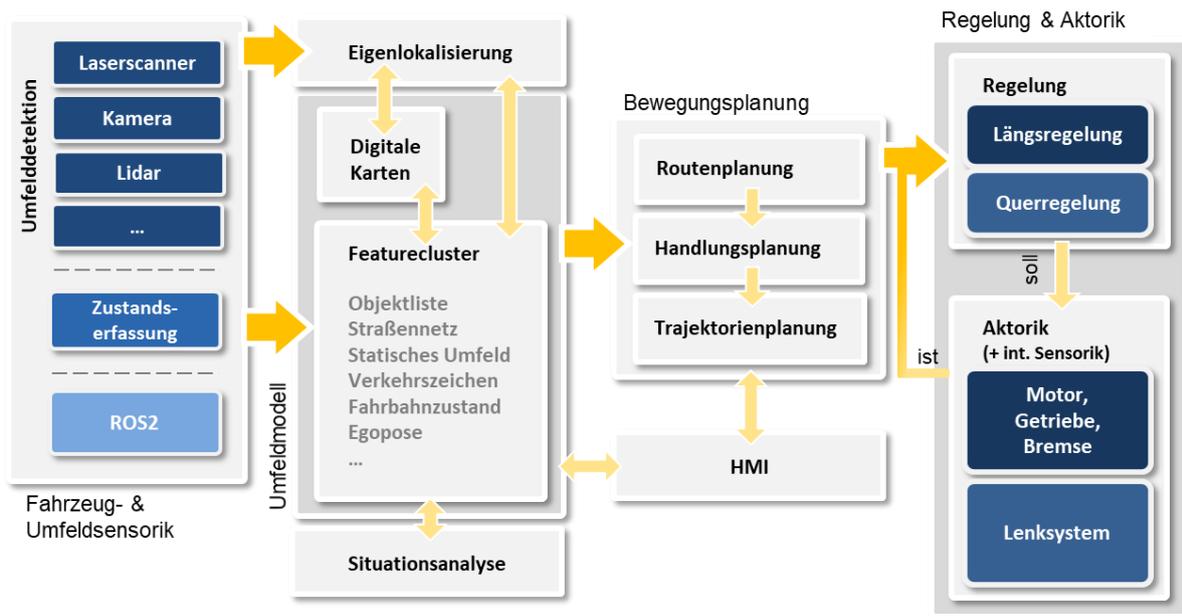


Abbildung 20: Modulare Top-Layer-Funktionsarchitektur der IfF-Fahrfunktion.

Neben umfangreicher Umfeldsensorik, welche die Fahrzeugumgebung erfassen, liefern auch weitere Bussysteme des Fahrzeuges, Zusatzsensorik wie die verbaute IMU, aber auch eine Vielzahl weiterer Partnersysteme, welche über entwickelte Kommunikationsschnittstellen angebunden sind, verschiedenste Informationen, welche als Eingangsgröße des Systems dienen.

Innerhalb eines modular aufgebauten Umfeldmodells werden diese Eingangsgrößen zu einer ganzheitlichen Darstellung der Fahrzeugumgebung abstrahiert. Durch eine hybride Umfeldmodellierung, welche zur merkmalsbasierten Repräsentation des dynamischen Umfelds eine Objektliste nutzt und damit maßgeblich andere Verkehrsteilnehmer abbildet und durch eine Rasterkarte zur Kartierung detektierter Hindernisse als auch freier Bereiche ergänzt wird, kann zum einen die speichereffiziente Darstellung von dynamischen Objekten und gleichzeitig die Darstellung komplexer Geometrien der statischen Umgebung erreicht werden. Datengrundlage bildet das Ibeo-Perzeptionssystem.

Zur Abbildung der vorliegenden Infrastruktur wurde ein Straßennetzmodell genutzt. Dieses verarbeitet die Informationen einer hochgenauen digitalen Karte, welche in diesem Fall als ODR-Karte vorliegt und seitens Ibeo für die Demonstrationsumgebung zur Verfügung gestellt wurde. Bei Bedarf könnte hier eine Anreicherung um weitere detektierte Infrastrukturelemente erfolgen.

Zur vollständigen Umfeldmodellierung wird außerdem eine Repräsentation des Ego-Fahrzeuges benötigt. Dabei werden sowohl Eingaben des Sicherheitsfahrers bzw. Bedieners als auch des Status vom Fahrzeug abgebildet. Ergänzt wird dies durch ein hinterlegtes kinematisches Fahrzeugmodell, welches zur Berechnung der Ego-Trajektorie genutzt wird.

Der Eigenlokalisierung kommt zudem eine übergeordnete Bedeutung zu, da diese für diverse Bereiche der Fahrfunktion von hoher Bedeutung ist. Hierbei sei auch auf AP3 verwiesen.

Im Modul der Bewegungsplanung werden dann die eigentlichen Trajektorien und Handlungsanweisungen an das Fahrzeug berechnet. Maßgebliche Herausforderung war hierbei, dass der darzustellende Use-Case deutlich umfangreicher bzw. vielfältiger war als die in der Vergangenheit zu demonstrierenden Fahrten, welche ein sehr spezielles Szenario adressiert haben. Dies machte eine Überarbeitung der Bewegungsplanung als Teil der Fahrfunktion erforderlich.

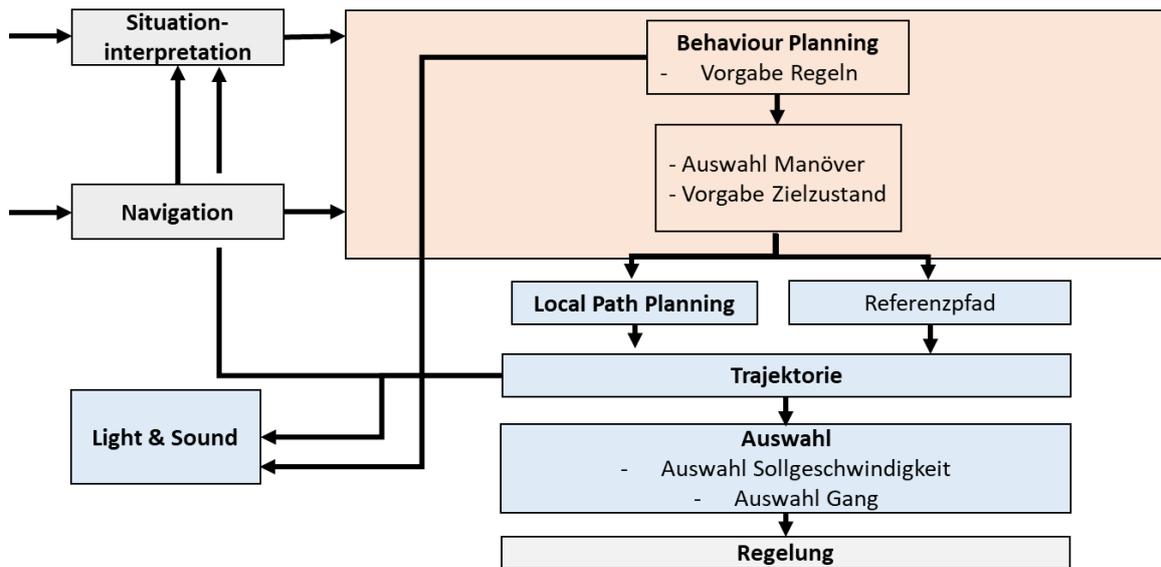


Abbildung 21: Konzept der Bewegungsplanung.

Das in Abbildung 21 entwickelte Konzept sieht hierbei eine systematische und sowohl prädiktiv-vorausplanende als auch situativ-reagierende Interpretation des Umfelds und der Verkehrssituation vor. Vereinfacht wird initial auf Basis der Informationen zu Zielposition und Startposition ein Pfad entlang der digitalen Karte geplant, welcher bereits auf übergeordnete Szenarien wie Kreuzungen oder Parkmanöver untersucht wird. Bei Abfahren des Pfades wird dann situativ die vorliegende Verkehrssituation ergänzend betrachtet und anschließend ein definiertes Szenario ausgewählt, wodurch dem Trajektorienplaner gewisse Regeln vorgegeben werden. Anschließend erfolgt die tatsächliche Trajektorienplanung, wobei je nach Situation verschiedene Verfahren angewandt werden können und maßgeblich vom Use-Case abhängen.

Bei Betrachtung des Demoszenarios sowie der digitalen Karte in Abbildung 22 wird deutlich, dass es für die Pfadplanung maßgeblich zwei Herausforderungen gibt:



Abbildung 22: Demoszenario mit ODR-Karte (weiß): 1) Fahren im Depot, 2) Wendehammer.

Beim Use-Case „Fahren im Depot“ (vgl. 1) in Abbildung 22 liegt zum einen keine digitale Karte vor. Weiterhin ergibt sich gerade beim Anfahren an Rampen oder auch bei versperrten Bereichen die Anforderung, dass das Fahrzeug Wende- bzw. Rangiermanöver ausführen können muss. Aus diesen Gründen wurde seitens IfF ein Freiraumplaner entwickelt, welcher einzig auf Basis des detektierten Umfelds eine Trajektorie zum Ziel plant und gleichzeitig auch Wendemanöver abbilden kann.

Wie bereits beschrieben, bildeten die detektierten Hindernisse und damit die vorgestellte Rasterkarte die maßgeblichen Eingangsgrößen für den Planer. Ziel war es, eine gegebene Soll-Position und –Orientierung zu erreichen. Der entwickelte Pfadplaner basiert dabei auf dem Hybrid-A*-Algorithmus. Innerhalb der Rasterkarte wird dabei eine baumartige Struktur aus befahrbaren Bewegungsprimitiven (Kreiselementen und Geraden) erzeugt, welche durch eine Schrittweite, definierten Lenkwinkel und den kinematischen Begrenzungen des Fahrzeugs bestimmt werden. Abbildung 23 zeigt für eine S-förmige Straße den erzeugten Suchbaum (blau) sowie den ausgewählten Pfad (rot).

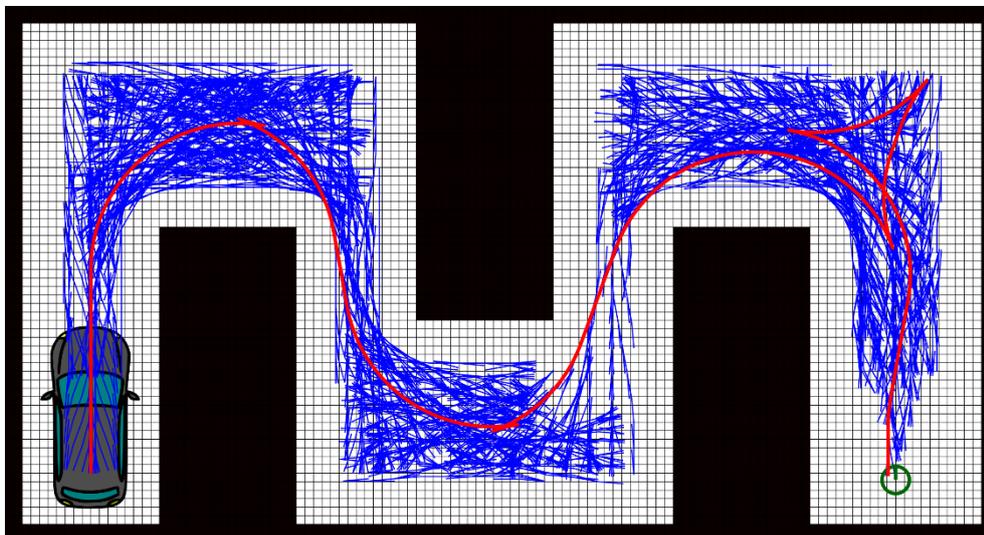


Abbildung 23: Suchbaum und gewählter Pfad des Freiraumplaners in der Simulation.

Mittels einer Kostenfunktion können dem geplanten Pfad gewünschte Eigenschaften aufgezogen werden. Dabei werden neben den üblichen Wegkosten auch häufige Fahrt- und Lenkrichtungswechsel bestraft. Diese auf die Steuerung des Fahrzeugs bezogenen Kosten werden durch die Kosten für die Lage des Pfades in Bezug auf erkannte Hindernisse ergänzt, wobei ein erweitertes Potentialfeld verwendet wird. Die Heuristik zur schnellstmöglichen Lösung des Planungsproblems besteht aus zwei Komponenten: Zum einen den Reeds-Shepp-Pfaden und zum anderen dem kürzesten Pfad für ein holonomes System, wobei immer der kritischere Teil berücksichtigt wird.

Abschließend folgt eine Kollisionsprüfung sowie eine Glättung des generierten Pfades, um die generierten Krümmungsdiskontinuitäten am Übergang der Bewegungsprimitive zu entfernen und einen durchfahrbaren Pfad zu erhalten. Der Bewegungsplaner wurde zunächst auf synthetische Testfälle in der Simulation angewendet. Abbildung 24 zeigt das Ergebnis für ein Planungsproblem, bei dem die Straße einen S-förmigen Verlauf hat und gleichzeitig sehr schmal ist. Zusätzlich soll das Fahrzeug die Zielposition (grüner Kreis in Abbildung 24) rückwärts erreichen, was die Ausführung eines Wendemanövers erfordert. Der Planer löst dieses Problem erfolgreich.

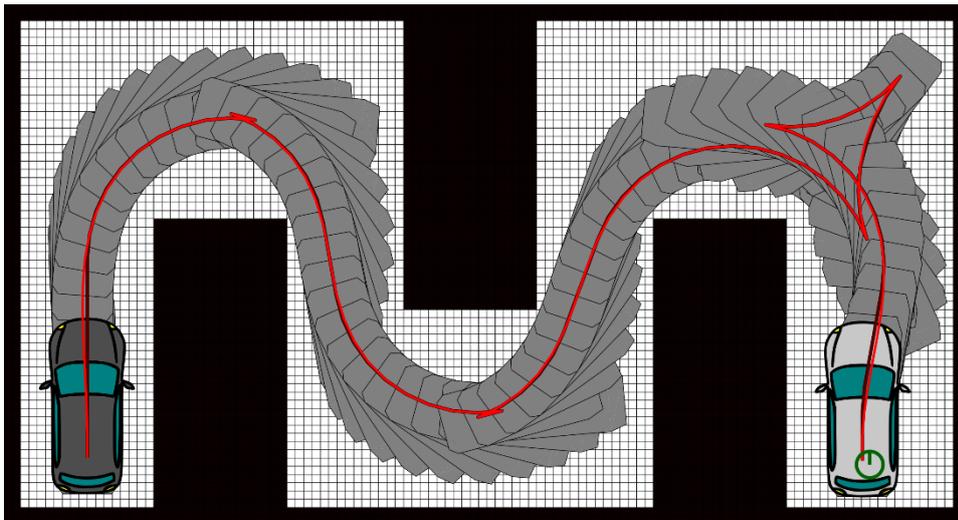


Abbildung 24: Geglätteter Pfad (rot) mit überstrichener Fläche (grau).

Beim Use Case „Fahren im Zustellgebiet“, also der eigentlichen Zustellfahrt, welche in der kartierten Umgebung stattfindet, wurde bisher eine initiale spurmittige Pfadplanung angewendet.

Dieser bisher verwendete spurmittige Pfadplaner hat zum einen Nachteile bzgl. des Fahrkomforts, da Kurven nicht krümmungsoptimiert und menschenähnlich geschnitten werden und zum anderen ergeben sich Probleme bei sehr engen Kurven. Generell begrenzt die kinematische Beschaffenheit des Fahrzeuges die befahrbaren Kurvenradien bzw. -krümmungen. Da der Versuchsträger mit 3,25 m einen recht hohen Radstand aufweist und gleichzeitig nur über eine Vorderachslenkung verfügt, ergibt sich nur eine begrenzte Wendigkeit. Bei Analyse der zu demonstrierenden Route wurde deutlich, dass einzeln Kurven bereits kritisch waren, aber vor allem der „Wendehammer“ nicht befahrbar war, ohne die digitale Karte zu verlassen, vgl. „2)“ in Abbildung 22.

Aus diesem Grund wurde ein Pfadplaner entwickelt, welcher mittels B-Splines einen krümmungsoptimierten Pfad berechnet und die kinematischen Begrenzungen des Fahrzeuges berücksichtigt. Folgend soll der entwickelte Algorithmus näher erläutert werden.

In einem ersten Schritt werden die berechneten Routeninformationen genutzt, um einen Fahr Schlauch und einen spurmittigen Initialpfad zu planen. Der Fahr Schlauch beschreibt dabei den nutzbaren Bereich, in dem sich das Fahrzeug bewegen darf. Entlang des Initialpfades werden dann in einer Typisierung Kurven und Geraden sowie verschiedene Kurvenkombinationen erkannt. Diese Informationen werden daraufhin für die eigentliche B-Spline-Interpolation genutzt. Mittels mehrmaliger Optimierungsschritte zum Einhalten des Fahr Schlauchs sowie der zulässigen Kurvenkrümmung (bedingt durch Fahrzeugkinematik) wird dann ein fahrbarer und krümmungsglatte Pfad berechnet. Abbildung 25 zeigt den gefundenen Pfad samt Fahr Schlauch und Krümmungsverlauf für die anspruchsvolle Fahrt aus dem Depot zum Haltepunkt, wobei der sehr enge Wendehammer durchfahren werden muss. Die Krümmung kann gegenüber der spurmittigen Planung deutlich auf ein fahrbares Maß reduziert werden.

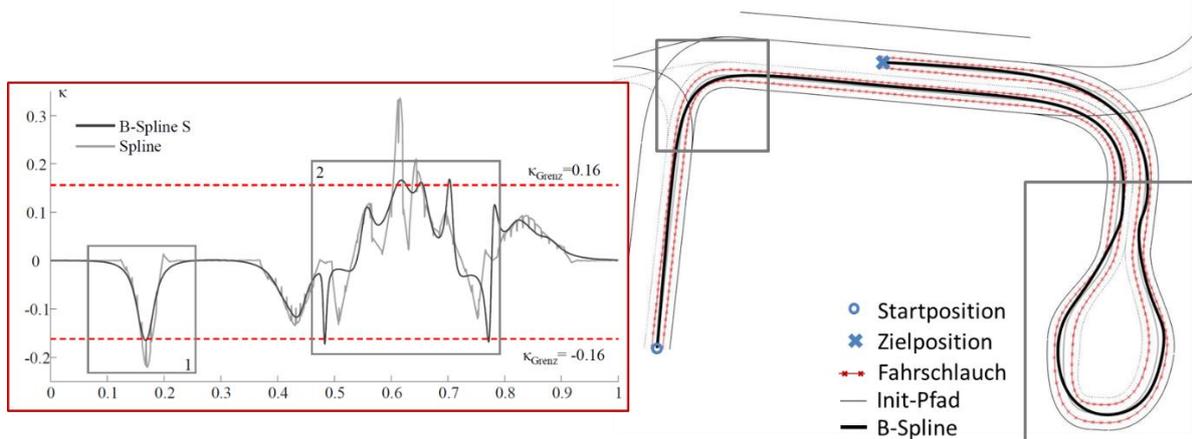


Abbildung 25: links: Krümmung des Pfades, rechts: Szenario und geplanter Pfad.

Eine weitere Entwicklung, welche auf dem vorgestellten Planer für Rangieraufgaben basiert, ist der sogenannte lokale Pfadplaner. Dieser nutzt einen ähnlichen Ansatz wie der Parkplaner und fusioniert dies mit dem kartenbasierten Planer. Anwendungsgebiet ist das lokale Umplanen des Pfades, welches bspw. beim Umfahren von Hindernissen notwendig wird. Abbildung 26 zeigt schematisch einen möglichen Anwendungsfall samt Simulation.

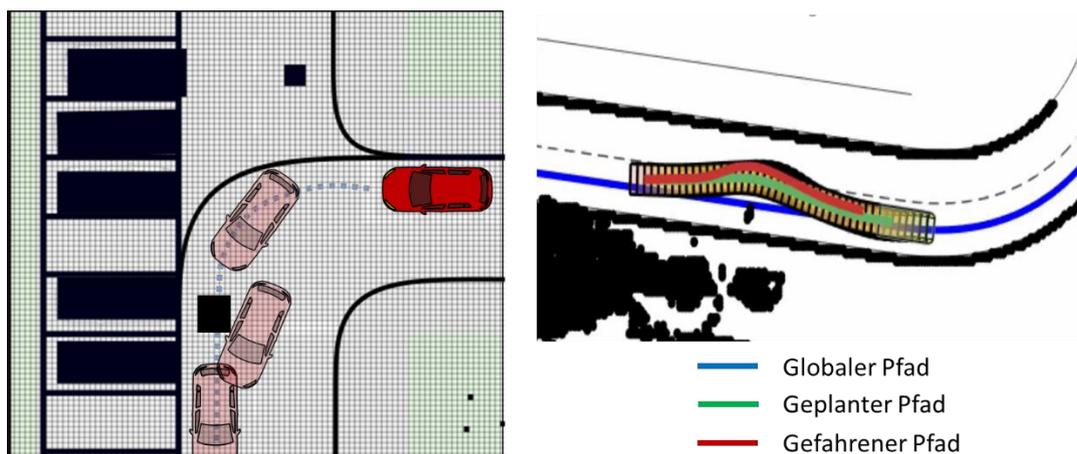


Abbildung 26: Lokaler Pfadplaner – links: abstrahiertes Szenario, rechts: geplanter Pfad (Simulation).

Die vorgestellten Arbeiten der Routen- und Pfadplanung sind in der Fahrfunktion eng mit der Handlungsplanung verknüpft, welche maßgeblich Entscheidungen trifft und die verschiedenen Subsysteme triggert. Kern dieses Moduls bildet ein Zustandsautomat, welcher in Abhängigkeit des Fahrzeugzustandes, welcher maßgeblich durch den aktuellen Missionsstatus und externe sowie interne Befehle beeinflusst wird, arbeitet.

Die abschließend in der Bewegungsplanung erzeugten Trajektorien werden unter Berücksichtigung des aktuellen dynamischen Fahrzeugzustands in Regelgrößen zur Ansteuerung der Fahrzeugaktorik überführt. Für die Querregelung kommt dabei ein PID-Abstandsregler mit Krümmungs- sowie Winkelvorsteuerung zum Einsatz.

Ein weiteres entwickeltes System bildet das externe HMI. Dieses setzt sich – wie in AP4 dargestellt – aus einem Display und LED-Bändern zusammen. In Abhängigkeit des Fahrzeug- sowie Missionsstatus werden hierüber Visualisierungen zur Kommunikation mit der Umwelt getätigt. So kann bspw. der Ladezustand, der Fahrtantritt oder auch ein möglicher Defekt der Umwelt mitgeteilt werden. Abbildung 27 zeigt exemplarisch eine Auswahl der entworfenen Display-Screens. Für die LEDs wurden neben einem Farbkonzept auch verschiedene Leuchtmodi (Blinken, Pulsieren, Laufband,...) entwickelt.

Zustand	Abbildung	Nr.	Zustand	Abbildung	Nr.	Zustand	Abbildung	Nr.	Zustand	Abbildung	Nr.
Keine Information		00	Fußgänger erkannt, Auto bremst nicht		30	Manueller Fahrmodus		20	Fahrzeug wird beladen		51
Default-Status zur Demonstration		01	Fußgänger erkannt, Auto bremst		31	Autonomer Fahrmodus		21	Fahrzeug wird entladen		52
Fahrzeugsystem startet/ arbeitet (GIF)		02	Fußgänger erkannt, Auto steht		32	Verringerte Geschwindigkeit		61	Ein- oder Ausstieg von Personen		53
Warnung, Notfall		10	Fahrzeug parkt ein		41	Fahrzeug lädt (GIF): Batterie: 0 – 30 %		93	Fahrzeug lädt (GIF): Batterie: 30 – 60 %		96
Notbremung aktiv		11	Parkvorgang erfolgreich beendet		42	Fahrzeug lädt (GIF): Batterie: 60 – 95 %		99	Fahrzeug geladen: Batterie: 95 – 100 %		90

Abbildung 27: Entwickelte Display-Screens für das externe HMI.

Der Zweck des AEB-Systems, das im Projekt von der Firma Ibeo entwickelt wurde, ist es, die vom autonomen Fahrsystem geplante Trajektorie zu überwachen und sie zu übersteuern, wenn es feststellt, dass die Trajektorie unsicher ist. Das AEB ändert den geplanten Pfad nicht, stattdessen wird nur die geplante Geschwindigkeit mit einer Vollbremsung überschrieben. Diese Trennung der Funktionalität bietet drei Hauptvorteile:

1. Es ermöglicht der Komfortfahrfunktion, innerhalb der Komfortgrenzen für die Beschleunigung zu bleiben. Das AEB übernimmt in dem Falle, in dem eine Bremsung über die Komfortgrenzen hinaus erforderlich ist.
2. Es ermöglicht der Komfortfahrfunktion, nur die wahrscheinlichsten Aktionen zu berücksichtigen, die andere Verkehrsteilnehmer ausführen werden. So kann die Komfortfahrfunktion beim Verfolgen eines anderen Fahrzeugs davon ausgehen, dass das andere Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit weiterfährt. Das AEB berechnet explizit, ob es für das Ego-Fahrzeug möglich wäre, eine Kollision zu vermeiden, wenn das andere Fahrzeug eine Vollbremsung durchführen würde.
3. Die Tatsache, dass das AEB ein separates System mit einem eigenen Prädiktions-schritt ist, bietet ein Maß an Redundanz und verbessert dadurch die Sicherheit des Gesamtsystems.

Das AEB prädiziert dynamische Objekte unter einer Reihe von "Worst-Case"-Annahmen und entscheidet darüber, welche Aktionen realistisch sind. Dazu gehört das Beschleunigen in jede Richtung innerhalb physikalischer Grenzen. Abbildung 28 zeigt schematisch die Prädiktion eines Fußgängers (pedestrian). Der äußere Kreis stellt den Bereich dar, den der Fußgänger im „Worst Case“ erreichen kann. Das bedeutet, wenn der Fußgänger beschleunigt und/oder die Richtung ändert. Es werden zunächst keine Aktionen berücksichtigt, die Verkehrsgesetze verletzen würden, bis sie tatsächlich auftreten oder es für das Objekt unmöglich erscheint, die Verletzung eines Verkehrsgesetzes zu vermeiden. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn ein Fahrzeug zu schnell fährt, um noch vor einer Kreuzung zum Stehen zu kommen. Dies ist in Abbildung 28 durch den inneren Kreis am Fußgänger visualisiert. Dies ist der Bereich, den der Fußgänger mit großer Wahrscheinlichkeit betreten wird, selbst wenn der Fußgänger plötzlich abstoppt.

Das AEB prüft dann die geplante Trajektorie des Ego-Fahrzeugs mit den Prädiktionen der Objekte und löst eine Notbremsung aus, sollten Ego-Trajektorie und Prädiktion interferieren. Das AEB berechnet in diesem Fall die erforderliche Verzögerung für das Ego-Fahrzeug, um eine Kollision ganz zu vermeiden oder die Aufprallgeschwindigkeit maximal zu reduzieren. Wenn dieser Wert einen vorgegebenen Schwellenwert erreicht, der durch die Komfortfahrfunktion nicht mehr gehandhabt werden kann, wird eine Notbremsung ausgelöst.

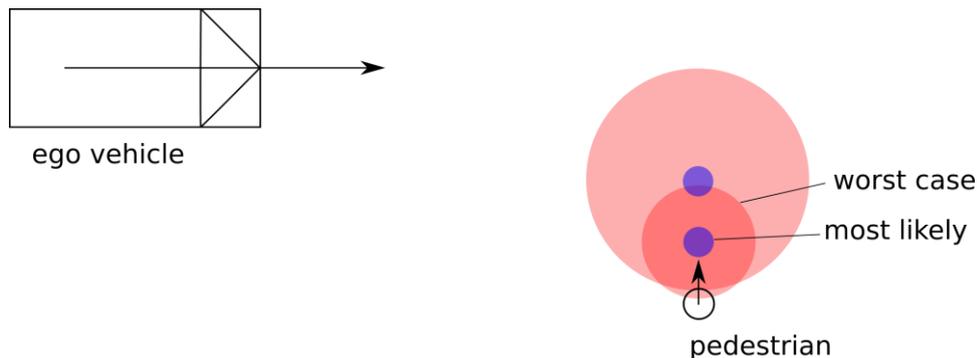


Abbildung 28: Schematische Darstellung des AEB.

3.7 AP7 Leitstand: Überwachung und Interaktion (TUC)

3.7.1 Einführung

Da die Absicherung und Gewährleistung der Zuverlässigkeit des autonomen Fahrens bis heute immer noch große Herausforderungen sind, fokussierte sich das Projekt „VanAssist“ im AP7 auf die Sicherstellung der Sicherheit des autonomen Fahrzeugs, insbesondere auf die Entwicklung einer kooperativen Softwarelösung aus zwei verteilten Systemen: ein Onboard Laufzeitüberwachungssystem mit verschiedenen Softwaremonitoren und ein Remote Leitstandsystem. Die Projektpartner DPD, HSO und TUC haben sich an der Bearbeitung von AP7 beteiligt und im Rahmen des Arbeitspaketes eng zusammengearbeitet. Hierbei ist die Expertise von DPD in die Entwicklung des Leitstandsystems eingeflossen. Außerdem hat DPD während des Projektverlaufs das Testen des Leitstandsystems begleitet.

Im Rahmen von AP2 wurde das Laufzeitüberwachungssystem auf dem autonomen Fahrzeug sowie das Remote Leitstandsystem in der Gesamtsystemarchitektur (vgl. Abs. 2.2.2), basierend auf den identifizierten Use-Cases auf der Systemebene, definiert. Zusätzlich wurde ein autonomes Fahrsystem auf dem Fahrzeug ebenfalls in der Gesamtsystemarchitektur eingeplant. Zur Vorbereitung der Entwicklung der einzelnen Systeme definierte TUC Schnittstellen zwischen dem autonomen Fahrsystem, dem Onboard Laufzeitüberwachungssystem und dem Remote Leitstandsystem. Diese wurden anschließend in engen Abstimmungen mit den Projektpartnern, wie u.a. IfF und HSO, im Projektverlauf weiter angepasst und finalisiert.

Anhand der Gesamtsystemarchitektur wurde ein übergreifendes Konzept für das Laufzeitüberwachungssystem mit einer detaillierten Architektur auf Komponentenebene entwickelt. In dieser detaillierten Architektur sind mehrere Softwaremonitore mit entsprechenden Komponenten im Laufzeitüberwachungssystem definiert. Zur Entwicklung der Softwaremonitore hatte **TUC** Sicherheitsanforderungen des autonomen Fahrzeugs formuliert und spezifiziert, um die relevanten Sicherheitsspezifikationen unter Berücksichtigung der Projekttrandbedingungen abzuleiten. Die Spezifikationen wurden anschließend formal modelliert und während der Entwicklung der entsprechenden Monitore verwendet. Parallel zur Entwicklung des Laufzeitüberwachungssystems, sowie dessen zugehörigen Softwaremonitoren, wurde eine detaillierte Architektur auf der Komponentenebene auch für das Leitstandsystem entwickelt. Basierend auf dieser Komponentenarchitektur, wurde das Leitstandsystem auch von TUC implementiert. Die Konzepte für das Laufzeitüberwachungs-¹⁴, sowie des Leitstandsystems¹⁵ wurden in entsprechenden wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht.

¹⁴ Grieser J. et Al.: Assuring the Safety of End-to-End Learning-Based Autonomous Driving through Runtime Monitoring. 23rd Euromicro Conference on Digital System Design (DSD), Kranj, Slovenia, 08.2020 DOI: 10.1109/DSD51259.2020.00081

¹⁵ Aniculaesei, A. et. al.: Graceful Degradation of Decision and Control Responsibility for Autonomous Systems based on Dependability Cages, 5. International Symposium on Future Active Safety Technology toward Zero Accidents, Blacksburg, Virginia, USA, 2019

Um die gesamte kooperative Softwarelösung zur Absicherung des autonomen Fahrzeugs evaluieren zu können, hat TUC eine Laborumgebung mit einer vergleichbaren Teststrecke und mehreren Modellfahrzeugen aufgebaut und anschließend in einer wissenschaftlichen Publikation veröffentlicht¹⁶. Das entwickelte Laufzeitüberwachungssystem sowie das Leitstandsystem wurden jeweils auf den Modellfahrzeugen und auf dem Remote Desktop-PC eingesetzt und anhand einer WLAN-Kommunikation in der Laborumgebung erfolgreich getestet und evaluiert. Anhand des Labortsetups wurden die von TUC implementierten Systeme auf das Setup für die finale Demonstration des Projektes mit dem Versuchsträger „Motionboard“ übertragen. Hierbei wurde das implementierte Laufzeitüberwachungssystem auf einem Industrie-PC migriert und anschließend in das „Motionboard“ integriert (vgl. Kapitel 3.9). Zusätzlich wurde das implementierte Leitstandsystem ebenfalls angepasst.

Anstelle der WIFI-Kommunikation im TUC-Laborsetup, wurde die Kommunikation zwischen dem Versuchsträger und dem Leitstandsystem in der finalen Demonstration des Projektes durch die HSO übernommen. Basierend auf den vordefinierten Systemschnittstellen wurde seitens der HSO mit den anderen Partnern eine detaillierte Schnittstellenspezifikation erstellt. Diese wurde von den jeweiligen Partnern separat implementiert und gemeinsam getestet. Hierbei wurde die Kommunikation zwischen dem beteiligten HSO-Kommunikationssystem (vgl. Kapitel 3.5) und dem TUC-Leitstandsystem über den bereits in AP5 beschriebenen Control-Center-Connector realisiert. Dieser wurde innerhalb dieses Arbeitspakets zusammen mit der TUC integriert. Durch die motivierte Zusammenarbeit wurde das AP7 erfolgreich abgeschlossen. In den folgenden Abschnitten wird der Lösungsansatz, sowie die konkreten implementierten Projektergebnisse des AP7 detailliert dargestellt.

3.7.2 Lösungsansatz

Der entwickelte Lösungsansatz in AP7 zur Absicherung des autonomen Fahrzeugs besteht aus zwei verteilten kooperativen Softwaresystemen: ein Onboard Laufzeitüberwachungssystem mit verschiedenen Softwaremonitoren und ein Remote Leitstand mit menschlichen Operatoren. Hierzu zählt ein sogenannter „Dependability Cage“, und ein Remote Leitstandsystem, welche durch ihre Funktionen unterschiedliche Verantwortungsbereiche besitzen. Abbildung 29 zeigt einen Überblick über die Verantwortlichkeiten sowie Funktionalitäten der beiden Systeme.

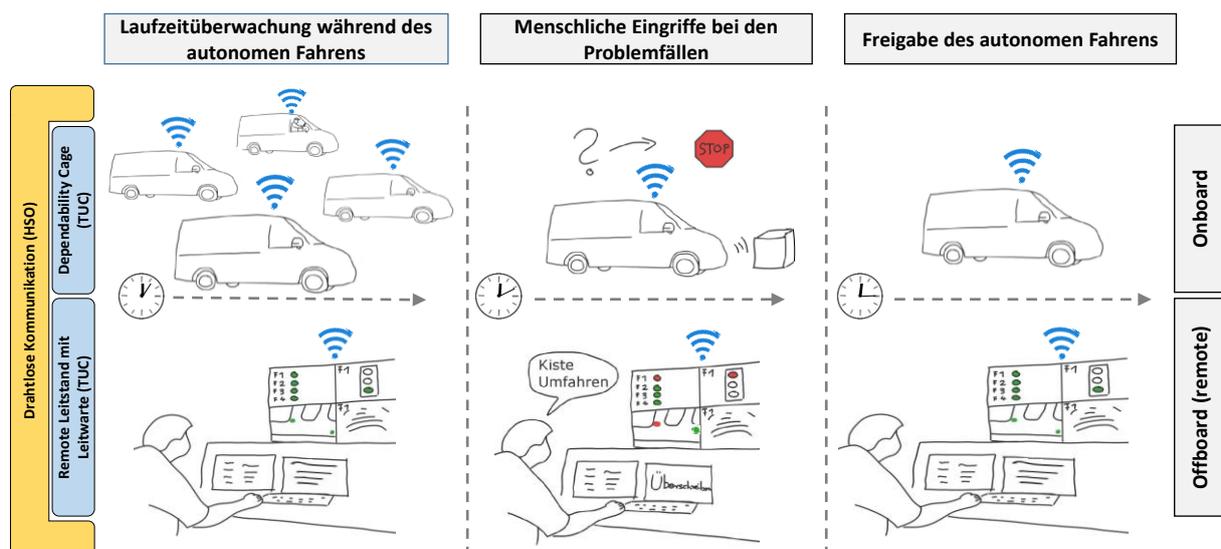


Abbildung 29: Use-Cases für die kooperative Sicherheitslösung im AP7.

¹⁶ Warnecke T. et Al.: Teaching Novices Supervised Learning with Autonomous Model Vehicles. 2020 IEEE 32nd Conference on Software Engineering Education and Training (CSEET), Munich, Germany, 11.2020. DOI: 10.1109/CSEET49119.2020.9206215

Grundsätzlich können „Dependability Cage“ und Leitstandsystem mit einem entsprechenden menschlichen Sicherheitsbeauftragtem, einem sogenannten Remote Operator, als redundantes Überwachungssystem auf verschiedenen Abstraktionsniveaus des autonomen Fahrzeugs interpretiert werden. Hierbei fokussiert sich der „Dependability Cage“ mit seinen Monitoren auf die Absicherung eines einzelnen autonomen Fahrzeugs. Anhand der aus den Sensoren gelieferten Rohdaten, beurteilt der „Dependability Cage“ zur Laufzeit durch Überprüfung der modellierten Sicherheitsspezifikationen, ob eine Spezifikationsverletzung vorhanden ist (Abbildung 29 links oben). Neben der Onboard Laufzeitüberwachung mit dem „Dependability Cage“, überwacht der Remote Operator offboard nicht nur ein einzelnes Fahrzeug, sondern eine ganze Fahrzeugflotte die gesamte Fahrzeugflotte, anstelle nur eines einzelnen autonomen Fahrzeugs (Abbildung 29 links unten).

Im Falle einer erkannten Verletzung einer Sicherheitsspezifikation, wird ein Problemfall für ein autonomes Fahrzeug identifiziert. Ein sogenanntes „Fail-Operational-Mode“ wird vom „Dependability Cage“ durch entsprechende Maßnahmen, wie z. B. in VanAssist ein Notstopp, ausgelöst (Abbildung 29 Mitte oben). Anschließend wird die Information über den identifizierten Problemfall durch eine drahtlose Kommunikation vom „Dependability Cage“ an das Leitstandsystem übermittelt. Da das Leitstandsystem eine Visualisierung des Live-Streams der Sensordaten anbietet, hat der Remote Operator am Remote Leitstand die Möglichkeit, anhand der vorhandenen Sensorvisualisierung die aktuelle Situation über den Problemfall zu beurteilen und den Problemfall zu bestätigen. Nach Bestätigung des Problemfalls wird der Remote Operator anschließend eine entsprechende Entscheidung zum menschlichen Eingriff treffen (Abbildung 29 Mitte unten). Hierbei bietet das Leitstandsystem unterschiedliche Möglichkeiten des menschlichen Eingriffs, wie z.B. die Rekonfiguration des autonomen Fahrsystems auf dem Fahrzeug oder die direkte Fernsteuerung des autonomen Fahrzeugs, sodass der Remote Operator als ein Offboard Sicherheitsfahrer interpretiert werden kann. Falls der identifizierte Problemfall nicht vom Remote Operator am Leitstand aus der Ferne gelöst werden kann, fordert der Remote Operator eine lokale menschliche Unterstützung, z. B. durch einen Zusteller in der Nähe des autonomen Fahrzeugs, an. Nachdem das Problem gelöst werden konnte, gibt der Remote Operator wieder das autonome Fahren für das Fahrzeug frei, wodurch die Überwachung der gesamten Flotte fortgeführt werden kann.

Basierend auf dem definierten Use-Case, wurden die konkreten Funktionen von dem „Dependability Cage“ und dem Leitstandsystem¹⁷ formuliert und eine übergreifende Architektur (vgl. Abbildung 30) für die gesamte kooperative Sicherheitslösung aus mehreren Layern abgeleitet, um die Eigenschaften der Schnittstellen zwischen den Systemen zu konkretisieren.

¹⁷ auf Englisch: Remote Command Control Center

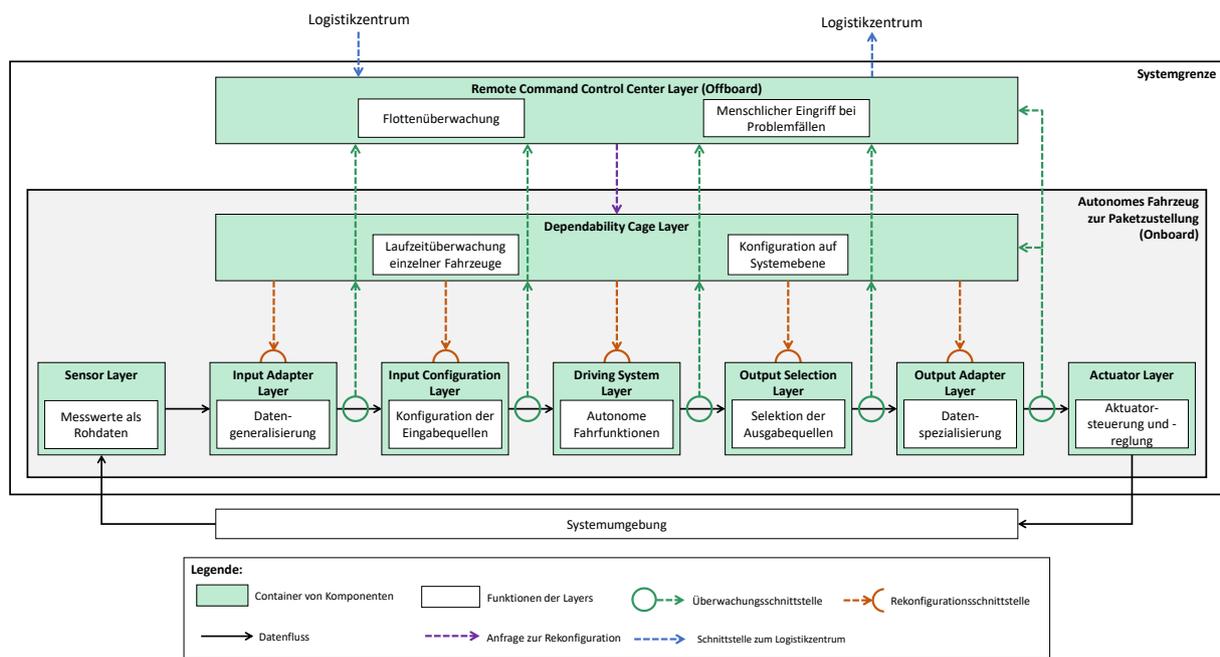


Abbildung 30: Übergreifende Architektur für die gesamte kooperative Sicherheitslösung.

In dieser übergreifenden Architektur wurden der „Dependability Cage“ und das Leitstandssystem jeweils als separate Layer dargestellt. Der gesamte Datenfluss von den Sensoren bis zu den Aktuatoren auf dem autonomen Fahrzeug wurde mithilfe des Pipeline-Musters durch sequenzielle Layer mit separierten Funktionen zerlegt. Zur Überwachung des autonomen Fahrzeugs haben sowohl der „Dependability Cage“ als auch das Leitstandssystem Überwachungsschnittstellen in der Pipeline. Aus der entgegengesetzten Richtung kann der „Dependability Cage“ durch die Rekonfigurationsschnittstellen Komponenten des autonomen Fahrzeuges anpassen. Durch die Rekonfiguration der Komponenten in dem Input Configuration Layer, kann der „Dependability Cage“ beispielweise eine alternative Eingabequellenkonfiguration der Sensordaten festlegen, um eine ausgefallene oder invalide Eingabequelle im „Fail-Operational-Mode“ zu ersetzen und damit den entsprechenden Problemfall zu eliminieren. Ein anderes Beispiel ist das Driving System Layer. Durch die Rekonfiguration der Komponenten im Driving System Layer kann das autonome Fahrsystem angepasst werden, um kritische Fahrscenarien, wie z. B. eine Fahrbahnverengung, zu bewältigen (vgl. Abschnitt 3.7.3). Im schlimmsten Fall kann sogar ein komplettes autonomes Fahrsystem durch ein alternatives redundantes Fahrsystem ersetzt werden, falls das ursprüngliche Fahrsystem ausfällt. Außer der Rekonfigurationsanfrage an den „Dependability Cage“ kommuniziert das Leitstandssystem zusätzlich noch mit dem Logistikzentrum, um die Informationen, wie z. B. die geplanten Logistikziele in den Fahraufgaben der Fahrzeugflotten, zu akquirieren.

Um die geplanten Funktionen des Onboard Laufzeitüberwachungssystems zu realisieren, wurde die Vorarbeit der TUC über die abstrakte Komponentenarchitektur vom „Dependability Cage“¹⁸ im Projekt verwendet, wie es z. B. in Abbildung 31 dargestellt ist. Ursprünglich hat der „Dependability Cage“ zwei wesentliche Komponenten: „Qualitative Monitor“ und „Quantitative Monitor“. Der „Qualitative Monitor“ überprüft die funktionale Verhaltenskorrektheit der überwachten Systeme bzw. Komponenten dieser mithilfe der vordefinierten und modellierten Sicherheitsspezifikationen. Der „Quantitative Monitor“ evaluiert die aktuelle Fahrssituation und versucht unbekannte Fahrssituationen als Neuheiten während der Laufzeit zu erkennen. Im Projekt „VanAssist“ wurde der „Quantitative Monitor“ ausgeschlossen. Für den „Qualitative Monitor“ wurden einige konkrete Sicherheitsspezifikationen im Projekt identifiziert. Daraufhin

¹⁸ Aniculaesei, A. et. al.: Towards A Holistic Software Systems Engineering Approach for Dependable Autonomous Systems. 1st International Workshop on Software Engineering for AI in Autonomous Systems, Gothenburg, Sweden, 08.2020 DOI: 10.1145/3194085.3194091

wurden zwei konkrete Monitore abgeleitet, die einerseits zukünftige Kollisionen mit Hindernissen und zum anderen invalide Kameradaten, wie z. B. durch eine Verdeckung, erkennen, um dementsprechend auf die Situation reagieren zu können. Diese Monitore wurden dann benutzt, um das übergreifende Konzept des „Dependability Cages“ zu evaluieren. Weitere Details über diese zwei konkrete Beispielsonitore werden in Abschnitt 3.7.3 dargestellt.

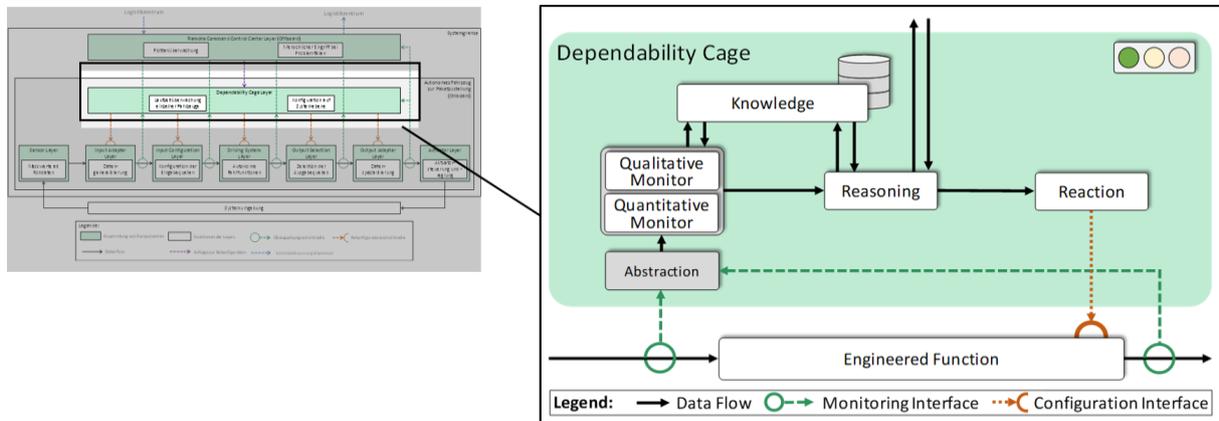


Abbildung 31: Abstrakte Komponentenarchitektur des Onboard Laufzeitüberwachungssystems „Dependability Cage“.

Der „Dependability Cage“ arbeitet mit dem Leitstandsystem zusammen, um die Sicherheit des autonomen Fahrzeugs sicherzustellen. In diesem Fall überwacht der „Dependability Cage“ das autonome Fahrzeug selbstständig ohne menschliche Beteiligung. Im Vergleich dazu ist das Leitstandsystem ein interaktives System mit einem menschlichen Remote Operator. Dadurch kann die Zusammenarbeit der beiden Systeme als eine Mensch-Maschine-Kollaboration interpretiert werden. Inspiriert von diesem Gedanken, wurde ein übergreifendes Sicherheitskonzept aus der Perspektive einer Verantwortungsverteilung zwischen dem autonomen Fahrzeug und dem menschlichen Sicherheitsbeauftragten, wie z. B. dem Remote Operator am Leitstandssystem, entwickelt.

Abbildung 32 zeigt dieses übergreifende Sicherheitskonzept, in dem die Verantwortungsverteilung zwischen dem autonomen Fahrzeug und dem menschlichen Sicherheitsbeauftragten über mehrere sogenannte Interventionsniveaus (IN_x) definiert wurde. Hierbei bedeutet das Interventionsniveau IN_0 , dass das autonome Fahrzeug 100% verantwortlich für die Sicherheit des autonomen Fahrens ist, wie es z. B. im normalen Betrieb der Fall wäre. Falls ein Problemfall vom „Dependability Cage“ erkannt wurde und das autonome Fahrzeug nicht in der Lage ist das autonome Fahren weiter durchzuführen, meldet sich der „Dependability Cage“ beim Leitstandsystem, damit der Remote Operator als menschlicher Sicherheitsbeauftragter, basierend auf dem festgelegten Interventionsniveau, eine Entscheidung über adäquate Eingriffmaßnahmen zum Lösen des Problemfalls treffen kann. Im Falle des Interventionsniveaus IN_{max} , wird dem Remote Operator die komplette Verantwortung über das autonome Fahrzeug zugewiesen, wodurch der Remote Operator aus der Ferne das autonome Fahrzeug manuell steuern muss.

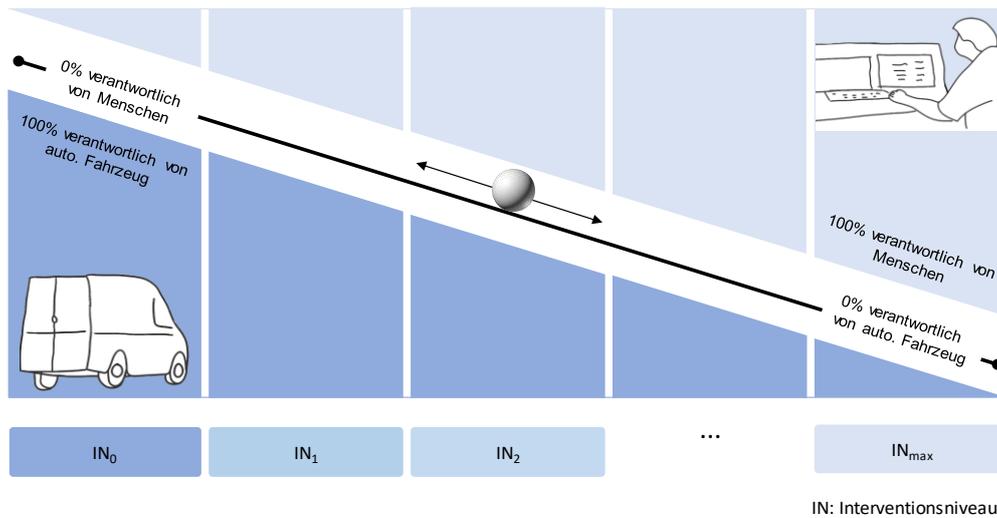


Abbildung 32: Übergreifendes Konzept zur Verantwortungsverteilung zwischen dem autonomen System und menschlichen Sicherheitsbeauftragter mit Interventionsniveaus.

Nach der Definition der Interventionsniveaus im übergreifenden Konzept zur Verantwortungsverteilung, hat TUC den Prozess zur Verantwortungsübergabe und die Transitionen zwischen den Interventionsniveaus weiter untersucht und somit das sogenannte Konzept der „Graceful Degradation“ entwickelt. Während des Projektverlaufs wurde dieses Konzept in einer wissenschaftlichen Publikation veröffentlicht¹⁹.

Mit dem Konzept „Graceful Degradation“ wird die Transition von einem niedrigen Interventionsniveau zu einem hohen Interventionsniveau als „Upgrade“ und umgekehrt als „Degradation“ bezeichnet. Ein entscheidender Punkt in diesem Konzept ist, dass das autonome Fahrzeug im Problemfall eine Anfrage des Upgrades mithilfe des „Dependability Cages“ an das Leitstandsystem senden darf. Jedoch muss in einem Degradation Prozess ein menschlicher Sicherheitsbeauftragter mit einbezogen werden, um die aktuelle Situation zu bestätigen und anschließend das Interventionsniveau zu reduzieren. Ein solches Prinzip stellt sicher, dass das autonome System im Problemfall niemals ohne Bestätigung des Menschen Aufgaben selbständig erledigt.

Abbildung 33 zeigt das Konzept der „Graceful Degradation“. Als ein generalisiertes Verfahren, wird das Konzept zur Verantwortungsverteilung und -übergabe im Rahmen des Projektes VanAssist als eine Musterlösung verwendet, um konkrete Interventionsniveaus sowie entsprechende Maßnahmen des menschlichen Eingriffs, demonstrieren zu können. Diese Beispiele werden im folgenden Abschnitt 3.7.3 weiter konkretisiert.

¹⁹ Aniculaesei, A. et. al.: Graceful Degradation of Decision and Control Responsibility for Autonomous Systems based on Dependability Cages, 5. International Symposium on Future Active Safety Technology toward Zero Accidents, Blacksburg, Virginia, USA, 2019

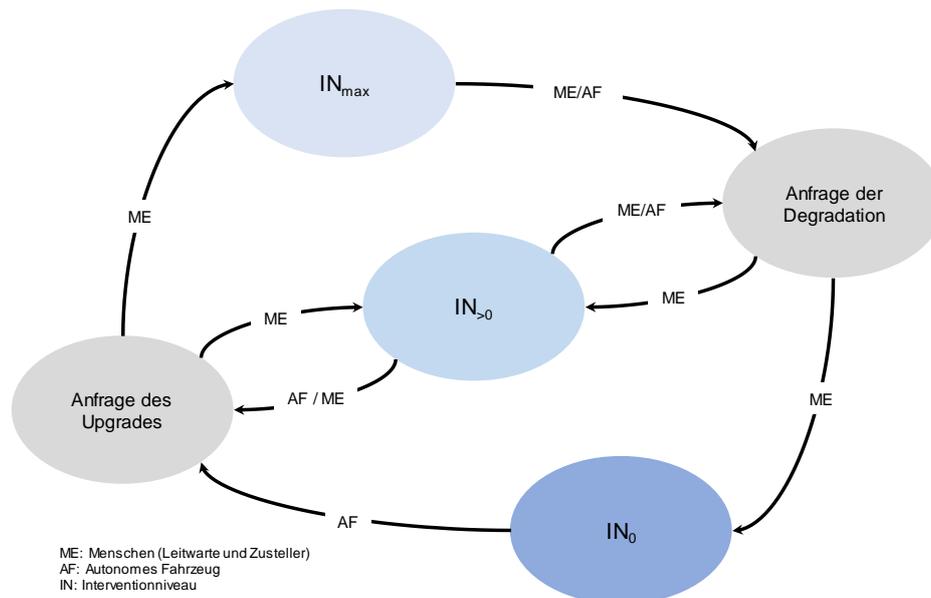


Abbildung 33: Verantwortungübergabe durch „Graceful Degradation“ in verschiedenen Interventionsniveaus.

3.7.3 Projektergebnisse

Im Rahmen des Projektes wurde die in Abbildung 30 dargestellte übergreifenden Architektur im TUC Labor und auf der realen Teststrecke erfolgreich implementiert. Das TUC Labor stellt hierbei eine verkleinerte Version der realen Teststrecke dar (vgl. Abbildung 34). Als Testfahrzeug kamen ADAS Modellfahrzeuge im TUC Labor zum Einsatz, welche das „Motionboard“ in der realen Testumgebung als Versuchsträger repräsentieren.

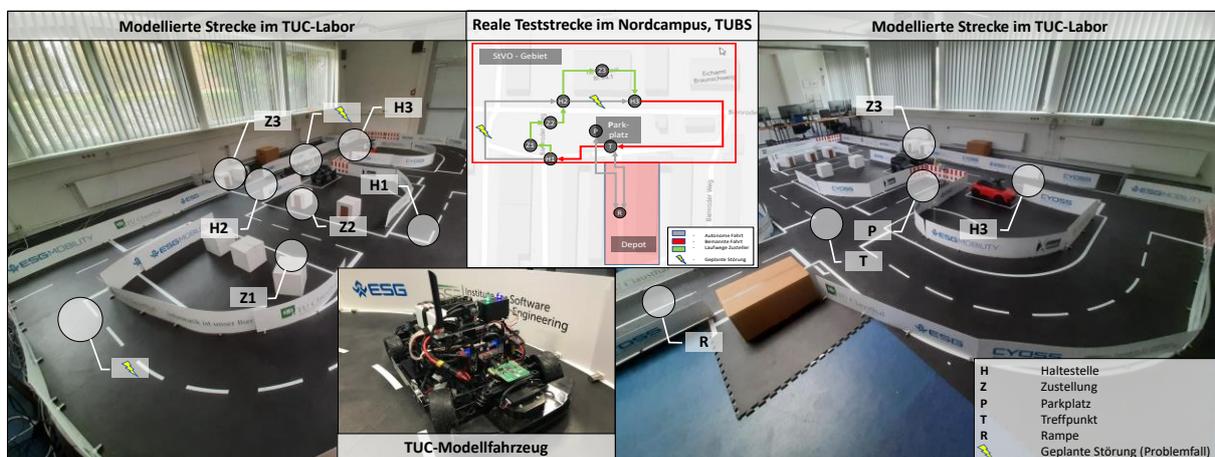


Abbildung 34: TUC-Laborumgebung zur Evaluation und Demonstration der Sicherheitslösung.

Zur Realisierung der in Abbildung 30 dargestellten übergreifenden Architektur wurde die moderne, dezentrale Middleware ROS2 eingesetzt. Durch das Publish-Subscribe Kommunikationsmuster von ROS2 können Softwarekomponenten in der Architektur als verteiltes System realisiert werden, ohne dabei Kenntnis über die Bereitstellung anderer Softwarekomponenten zu besitzen. Um das Konzept zu realisieren, wurden geeignete ROS2-Komponenten, sowohl für das TUC Labor als auch für die reale Teststrecke in den Layern der übergreifenden Architektur identifiziert und implementiert.

Um die übergreifende Architektur zunächst in der TUC Laborumgebung umzusetzen, wurden im Sensor und Actuator Layer hardware-spezifische Komponenten der ADAS Modellfahrzeuge erstellt, sodass Sensoren (LiDAR-Punktwolken, Kamera Bilder, Indoor GPS-Position, Ultraschall-Daten, IMU Daten, Remote Control Sensor) ausgelesen und Aktuatoren (Motor,

Lenkung, Indikator Lampen) beeinflusst werden können. Innerhalb des Input Adapter Layers werden diese dann durch Komponenten, welche die Rolle spezifischer Hardwareadapter einnehmen, generalisiert, sodass diese Sensordaten in der weiteren Pipeline berücksichtigt werden können. Zusätzlich werden hier auch Befehle der Remote Steuerung des Remote Leitstandsystems adaptiert.

Infolgedessen wurden im Input Configurator Layer Komponenten erzeugt, die eine dynamische Konfiguration der Eingabequellen für nachfolgende Komponenten erlauben. In Abhängigkeit vom Fahrmodus wurde so das On- bzw. Offboard Fahren des Fahrzeugs realisiert, indem Steuerungsbefehle entweder durch eine Onboard Eingabequelle oder durch eine Offboard Eingabequelle verwendet wurden.

Im Driving System Layer wurden eine Reihe von Komponenten erstellt, die Fahrsysteme repräsentieren, um Steuerbefehle bzw. Sollwerte in einer generalisierten Datenrepräsentation für Aktuatoren zu ermitteln. Hierbei gilt, dass alle Fahrsysteme kontinuierlich Steuerbefehle bzw. Sollwerte produzieren. Sie sind somit nebenläufig. Identifiziert wurden die Fahrsysteme „Fully Autonomous Driving“, „Limited Autonomous Driving“, „Manual Driving“ und „Emergency Brake“. „Fully Autonomous Driving“, realisiert eine autonome Fahrfunktion ohne Einschränkungen, aber mit strengeren Sicherheitskriterien. Dahingehend realisiert „beschränktes autonomes Fahren“ eine autonome Fahrfunktion, die in ihrer Freiheit eingeschränkt wird, aber durch abgeschwächte Sicherheitsvorkehrungen abgesichert wird. „Manual Driving“ repräsentiert das Fahren durch einen Menschen. Die Unterscheidung, ob das manuelle Fahren on- oder offboard erfolgt, wird durch die Konfiguration von Komponenten des Input Configurator Layers festgelegt. Das Fahrsystem „Emergency Brake“ realisiert eine Fahrfunktion, die eine Notbremsung beim Fahrzeug auslöst.

Zusätzlich wurden dem Driving System Layer Komponenten hinzugefügt, die den aktuellen Zustand einer Mission (Fahraufgabe) bestimmen. Hierbei wird zwischen den Zuständen „Inactive“, „Active“, „Blocked“ und „Completed“ unterschieden. Der Zustand „Inactive“ bedeutet, dass das Fahrzeug zurzeit keine Fahraufgabe erfüllt. Dahingehend bedeutet „Active“, dass das Fahrzeug aktuell eine Fahraufgabe bearbeitet, welche allerdings noch nicht vollendet wurde. Sollte während der Bearbeitung einer Fahraufgabe ein Problem auftreten („Fail-Operational Mode“), welche das Fahrzeug daran hindert die aktuelle Fahraufgabe abzuschließen, wird der Zustand „Blocked“ gefolgert. Nachdem eine Fahraufgabe abgeschlossen wurde, folgt der Zustand „Completed“.

Wie bereits erwähnt, sind Fahrsysteme des Driving System Layers nebenläufig. Da nur die Steuerbefehle bzw. Sollwerte eines Fahrsystems die Aktuatoren am Ende der Pipeline bearbeiten dürfen, wurde dem Output Selection Layer eine Komponente hinzugefügt, die nur Steuerbefehle bzw. Sollwerte des zurzeit ausgewählten Fahrsystems an Komponenten des Output Adapter Layers weiterleitet, sodass diese dann die Konvertierung in das hardware-spezifische Datenformat der Aktuatoren vornehmen kann.

Um das in Abbildung 33 vorgestellte Konzept der Verantwortlichkeitsverteilung von Sicherheitsbeauftragten zwischen Mensch und Maschine zu implementieren, wurde der Dependability Cage Layer und das Remote Command Control Center Layer (vgl. Abbildung 30) zunächst im TUC Labor durch die Middleware ROS2 als konkrete Instanzen realisiert. Hierzu wurden, basierend auf dem Hardwaresetup der Versuchsträger und den Anwendungsfällen aus Abbildung 29, Komponenten des „Dependability Cages“ zur Laufzeitüberwachung von Sicherheitsspezifikationen und Rekonfiguration von Komponenten abgeleitet. Eine detaillierte Ansicht des „Dependability Cages“ im Rahmen des Projektes ist in Abbildung 35 dargestellt.

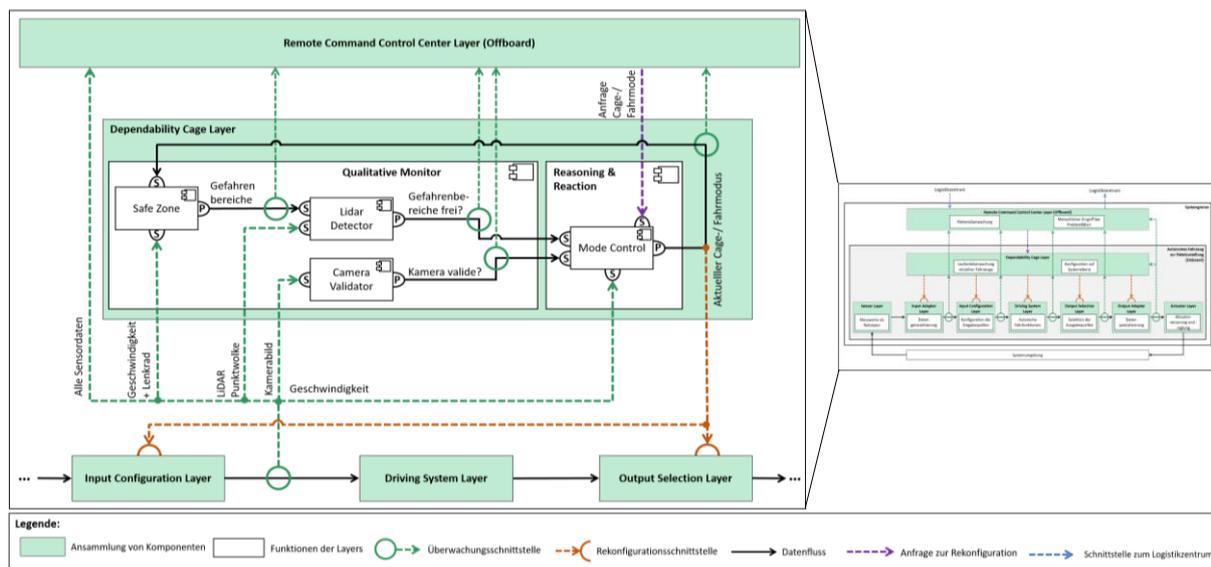


Abbildung 35: Komponentensicht des „Dependability Cages“.

Der untere Teil in Abbildung 35 zeigt einen wesentlichen Ausschnitt der oben beschriebenen Pipeline, welche auf Basis des aktuellen Fahrmodus konfiguriert wird. Auf Grund der Definition und Nebenläufigkeit der Fahrsysteme im Driving System Layer, wird in dieser Instanz der Architektur keine Konfiguration des Driving System Layers benötigt. Der Fahrmodus wird durch eine Komponente des Dependability Cage Layers, der sog. Mode Control, ermittelt. Diese Komponente realisiert die Reaction Funktion und einen wesentlichen Aspekt der Reasoning Funktion des Dependability Cage Konzeptes, indem sie, basierend auf einer komplexen Spezifikation, alle Ergebnisse des qualitativen Monitors und alle Anfragen auf Änderungen des Cages bzw. Fahrmodus des Remote Command Control Center Layers zusammenführt und einen aktuellen Cage- und Fahrmodus bestimmt. Hierfür wurden Komponenten des „Qualitative Monitor“, basierend auf dem Hardwaresetup und den Anwendungsfall, abgeleitet.

Zum einem existiert die Komponente „Camera Validator“, die durch Quantisierung der Schärfe eines Bildes der Kamera diese Sensordaten validiert. Bei Unterschreitung eines Schwellwertes wird die Kamera als Invalide klassifiziert.

Zum anderem existieren die Komponenten „Safe Zone“ und Lidar Detector, um abzusichern, dass das Fahrzeug nicht gegen oder über Hindernisse fährt. Die Komponente „Safe Zone“ realisiert das Konzept der „Safe Zone“. Die „Safe Zone“ besteht in diesem Fall aus zwei Teilzonen, der „Clear Zone“ und der „Focus Zone“, die Gefahrenbereiche auf Basis des Bremsweges des Fahrzeugs kennzeichnen. Die Teilzonen sind entweder ein Rechteck oder ein Kreisbogen. Hierbei gilt, dass die „Focus Zone“ stets größer ist als die „Clear Zone“. Die ermittelte „Safe Zone“ wird dem „LiDAR Detector“ übermittelt, der dann überprüft, ob sich Hindernisse in der „Clear Zone“ bzw. „Focus Zone“ befinden. Hierbei gilt, dass wenn die „Focus Zone“ frei von Hindernissen ist, dass auch die „Clear Zone“ frei von Hindernissen ist.

Zudem wurden Komponenten zur Visualisierung der Sensordaten in einer grafischen Benutzeroberfläche abgeleitet, die im Folgenden als Leistand-GUI V1.0 bezeichnet wird. Abbildung 36 zeigt die Visualisierung der Sensor- und Dependability Cage Daten des ADAS Modellfahrzeugs im TUC Labor während eines Problemfalls, der durch den Dependability Cage erkannt wurde.

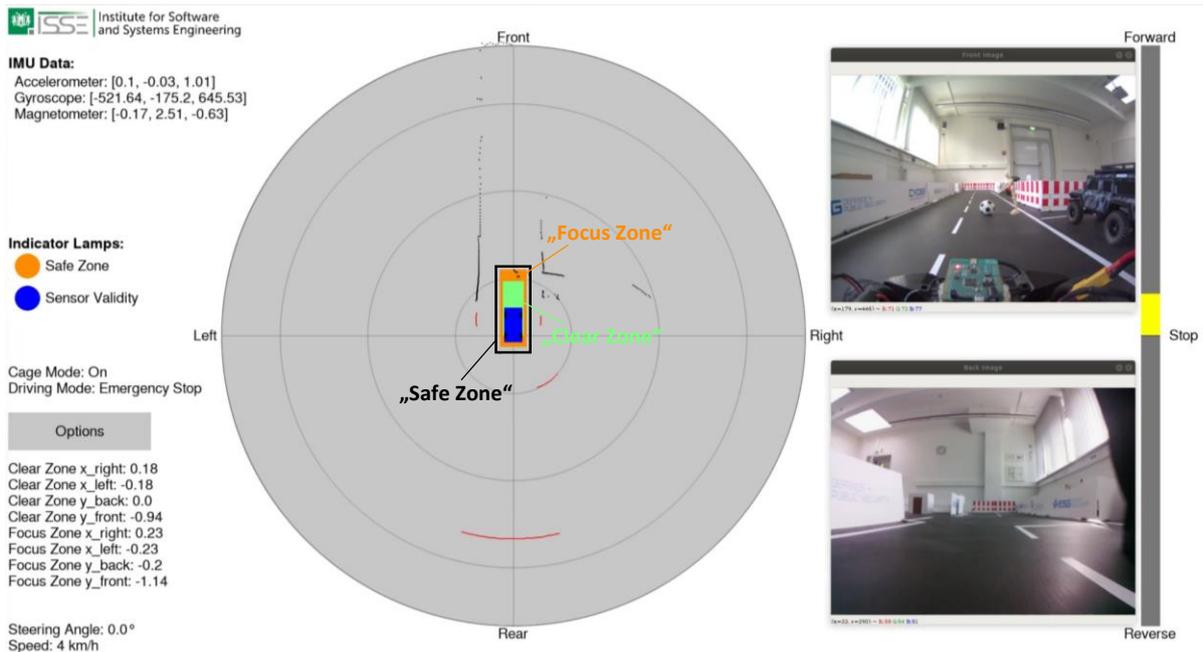


Abbildung 36: Visualisierung der Sensoren im Leistand-GUI V1.0 während eines Hindernisses auf der Fahrbahn.

Auf der linken Seite und rechten Seite der GUI werden dem Remote Operator allgemeine Sensordaten, wie z.B. Kamera- und Bewegungsdaten sowie der aktuelle Cage- und Driving Mode visuell bzw. textuell präsentiert. Dabei entspricht die textuelle Beschreibung des Cage- und Driving Modus der o.g. Beschreibung der Modi. Zudem wird visuell dargestellt, ob sich Hindernisse in der „Safe Zone“ befinden und ob Sensordaten valide sind. Die Darstellung auf der grafischen Oberfläche erfolgt dabei wie folgt:

- Erkennung, ob sich ein Objekt in der Safe Zone befindet
 - Grün: Die „Focus Zone“ ist frei von Objekten
 - Orange: In der „Focus Zone“ befindet sich mindestens ein Objekt
 - Rot: In der „Clear Zone“ befindet sich mindestens ein Objekt
- Erkennung ob Sensordaten Valide sind
 - Blau: Sensordaten sind valide
 - Blinkend: Sensordaten sind nicht valide

In der Mitte der grafischen Oberfläche findet sich eine integrierte Darstellung mehrerer Sensoren, die dem Remote Operator helfen soll, die aktuelle Situation schnell und intuitiv zu beurteilen. Das blaue Rechteck in der Mitte der integrierten Darstellung zeigt eine überapproximierte Darstellung des Fahrzeugumfangs, die den Remote Operator bei der Orientierung helfen soll. Umgeben wird die Darstellung des Fahrzeugumfangs durch die Visualisierung der Safe Zone, die in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Fahrzeugs größer wird. In Abhängigkeit des aktuellen Lenkwinkels entspricht die „Safe Zone“ entweder einem Rechteck oder einem Kreissegment. Dabei stellt der grüne Bereich die „Clear Zone“ und der orange Bereich die „Focus Zone“ dar. Die schwarzen Punkte, die das Fahrzeug umgeben visualisieren die Punktwolke, die durch die LiDAR Sensorik gemessen wurde. Dahingehend repräsentieren rote Kreisbögen überapproximierte Messungen der Ultraschallsensoren. Da sich das Gesamtsystem vor der Aufnahme der Abbildung noch im Fahrmodus „Fully Autonomous Driving“ befand, gilt das Sicherheitskriterium, dass die „Dependability Cage“ in dem aktuellen Zeitschritt in der Lage war, die Hindernisse auf der Straße in der „Focus Zone“ zu erkennen, wodurch der Fahrmodus „Emergency Stop“ gefolgert wurde. Die Hindernisse werden durch eine Figur und einem Ball

repräsentiert, die u. a. auf der rechten Seite durch in der Visualisierung der vorderen Kamera dargestellt werden.

In Abbildung 37 wird der Anwendungsfall aus Sicht der Leistand-GUI V1.0 gezeigt, in dem der „Dependability Cage“ eine Verdeckung der vorderen Kamera erkennt und einen „Fail-Operational Mode“ auslöst. Dargestellt wird dies durch eine blinkende Sensor Validity und durch eine zusätzliche Beschriftung auf der Anzeige für die vordere Kamera.

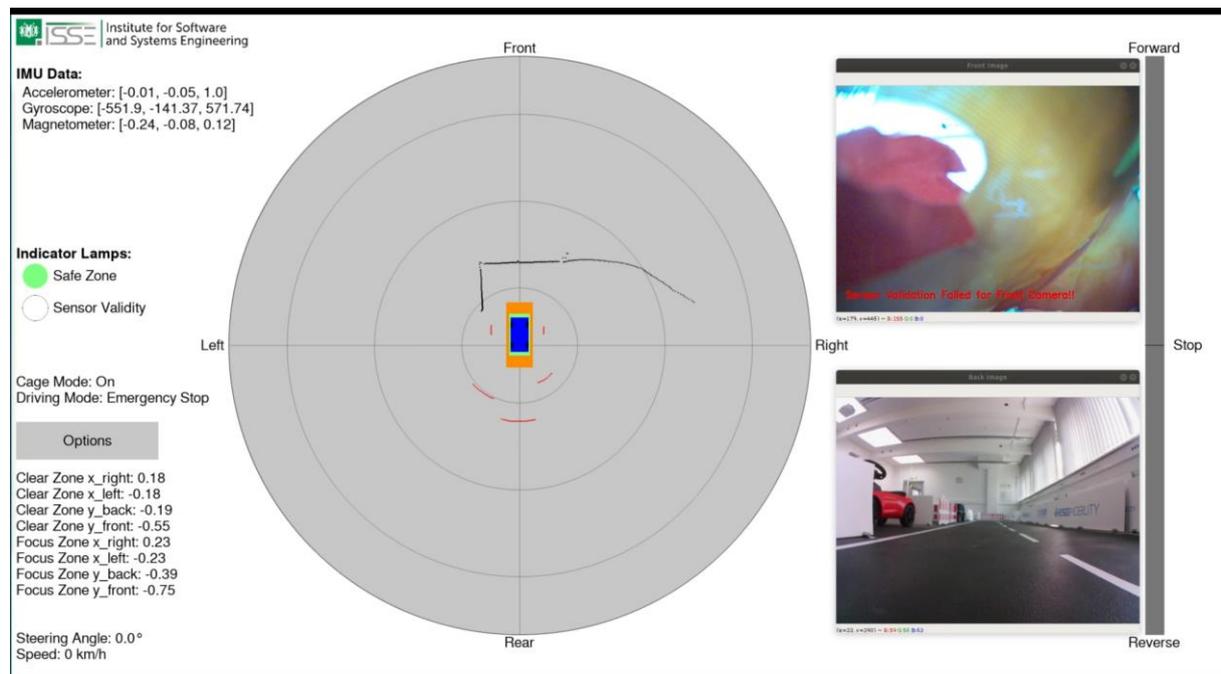


Abbildung 37: Visualisierung der Sensoren im Leistand-GUI V1.0 bei verdeckter Kamera.

Neben dieser Visualisierung wurde für die Leistand-GUI V1.0 auch eine grafische Benutzeroberfläche erstellt, in der das System, basierend auf Anfragen zur Änderung des Fahrmodus, rekonfiguriert werden kann. Die rechte Seite in Abbildung 38 zeigt die grafische Benutzeroberfläche, mit der ein Remote Operator das Gesamtsystem durch Änderung des Modus rekonfigurieren kann. Hierbei stellen Schalter in grüner Farbe einen realisierten Fahr- bzw. Cagemodus dar. Auf der linken Seite der Abbildung 38 wird eine weitere Benutzeroberfläche dargestellt, um Missionen, die durch das Logistikzentrum bereitgestellt wurden, zu verwalten und diese auf einer Karte zusammen mit der aktuellen Position des Fahrzeugs darstellen zu können. Zudem wird der aktuelle Zustand der Mission in Form der o.g. Missionszustände visuell und textuell dargestellt.

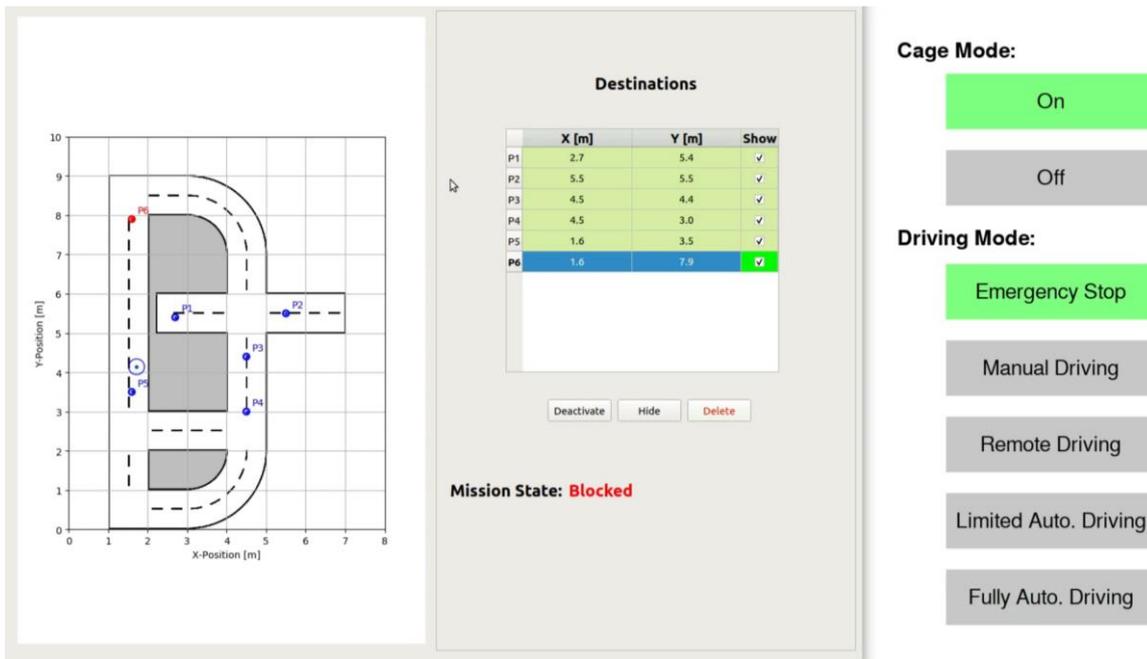


Abbildung 38: Missionskontrolle und Menschlicher Eingriff im Leitstand-GUI V1.0.

Innerhalb des TUC Labors ist es u.a. möglich das Fahrzeug mit Hilfe der Leitstand-GUI V1.0 zu steuern (vgl. Abbildung 39). So lassen sich Probleme, z.B. das Fahren durch eine Fahrbahnverengung, aus der Ferne durch manuelle Steuerung eines Menschen lösen.



Abbildung 39: Fernsteuerung des autonomen Fahrzeugs im Leitstand-GUI V1.0.

Nach erfolgreicher Erprobung im TUC Labor wurde die Implementierung auf das reale Testsetup mit dem „Motionboard“ übertragen. Hierzu wurden zunächst Layer der Architektur identifiziert, die angepasst bzw. entfernt werden mussten. Bei der Analyse stellte sich heraus, dass Driving System Layer, Output Selection Layer, Output Adapter Layer und Aktuator Layer als Blackbox durch die Implementierung von IfF betrachtet werden können. Auch wenn ein großer Teil des Sensor Layers durch die Arbeit der Projektpartner abstrahiert werden konnte, wurde dieser beibehalten, um Sensordaten von Projektpartnern, die Sensordaten nicht durch die Middleware ROS2 übertragen, in ROS2 Nachrichten zu konvertieren. Nach der Analyse wurden

überwiegend Adapter im Input Adapter Layer erstellt, wodurch die partnerspezifischen Datentypen generalisiert werden konnten, sodass ein Großteil der bereits erfolgten Implementierung erhalten bleiben konnte. Die Integration mit dem IfF, um Bewegungsinformationen zu erhalten und den Fahrmodus des „Motionboards“ festzulegen, erfolgte hierbei über ROS2. Um Kameradaten durch den Projektpartner IAV zu erhalten, wurde ebenfalls ROS2 verwendet. Die Integration mit dem Projektpartner Ibeo, um LiDAR-Punktwolken zu empfangen, erfolgte über das zu Verfügung gestellte Ibeo SDK, mit welchen die LiDAR Sensoren über eine Netzwerkverbindung ausgelesen werden können. Diese werden anschließend durch eine Komponente im Sensor Layer zu einer Komponente im Input Adapter Layer über ROS2 übertragen. Die Integration mit der Kommunikationsinfrastruktur, zur Übertragung der Daten vom „Motionboard“ zum Leitstandsystem (Remote Command Control Center), welche durch den Projektpartner HSO bereitgestellt wurde, erfolgte ebenfalls über ROS2. Hierzu wurden zusätzliche Adapter erstellt, die u. a. die Übertragung der LiDAR-Punktwolken zum Leitstandsystem als Bild realisieren, sodass der allgemeine Kommunikationsaufwand reduziert werden konnte. Die Integration mit dem HSO Management, um die Kommunikation mit dem Logistikzentrum zu realisieren, erfolgte über einen Webservice, der auf REST basiert. Hierzu wurden ebenfalls notwendige Adapter erstellt.

Um den LiDAR Detector des „Dependability Cages“ mit dem veränderten Testsetup kompatibel zu machen, mussten zusätzliche Anpassungen vorgenommen werden, da zum einen acht LiDAR Sensoren Punktwolken liefern und zum anderem diese dreidimensional repräsentiert werden. Die erhöhte Präzision der einzelnen LiDAR-Sensoren führte zudem zu einer vermehrten Anzahl von Punkten innerhalb der LiDAR-Punktwolken, welche die Sicherheit des Fahrzeugs jedoch nicht gefährden (Ghosting Points), jedoch zu unnötigen Notstopps führen. Um diesem Problem entgegenzuwirken, wurden LiDAR-Punkte gruppiert, bei denen eine Gruppe eine definierte Anzahl an Punkten beinhalten muss, damit sie bei der Objekterkennung in der „Safe Zone“ berücksichtigt werden. Zudem wurden Applikationsparameter für die Komponenten Safe Zone und LiDAR Detector, wie z. B. die Größe des Fahrzeugs und Reaktionszeit, appliziert.

Für die Einbindung des Leitstands in VanAssist wurden seitens der **HSO** und zusammen mit den anderen Partnern eine detaillierte Schnittstellenspezifikation erstellt. Diese wurden von den jeweilig beteiligten Partnern separat implementiert und gemeinsam getestet. Hierbei entstand eine Kommunikation zwischen den beteiligten Komponenten HSO-Leitwarte und TUC-Leitwarte über den bereits in AP5 beschriebenen Control-Center-Connector. Dieser wurden innerhalb des Arbeitspakets zusammen mit der TUC verknüpft.

Zunächst wurde das Leitstandsystem mit der Leistand-GUI V1.0 integriert. Nachdem die Funktionalität im Rahmen des veränderten Testsetups erfolgreich nachgewiesen werden konnte, wurde die grafische Benutzeroberfläche, die im Folgenden Leistand-GUI V2.0 bezeichnet wird, mit Hilfe von modernen Bibliotheken bzw. Frameworks zur Erstellung grafischer Benutzeroberflächen aktualisiert. Der Leistand-GUI V2.0 ist in Abbildung 40 dargestellt. Diese neue Benutzeroberfläche beinhaltet alle Funktionalitäten der bisherigen Leistand-GUI V1.0 und bietet zudem die Möglichkeit, die Oberfläche nach den Wünschen des Benutzers anzupassen. Die Abbildung zeigt das Problemszenario einer verengten Fahrbahn. Da sich das System zuvor im Fahrmodus „Fully Autonomous Driving“ befand, muss die „Focus Zone“ frei von Hindernissen sein, was jedoch in der vorliegenden Situation nicht der Fall ist. Der „Dependability Cage“ konnte nach Anpassung an das neue Hardwaresetup diesen Problemfall erkennen und einen entsprechenden Notstopp auslösen. Zudem lässt sich das Leistand-GUI V2.0 auf mobilen Geräten, wie z. B. einem Laptop, ausführen.

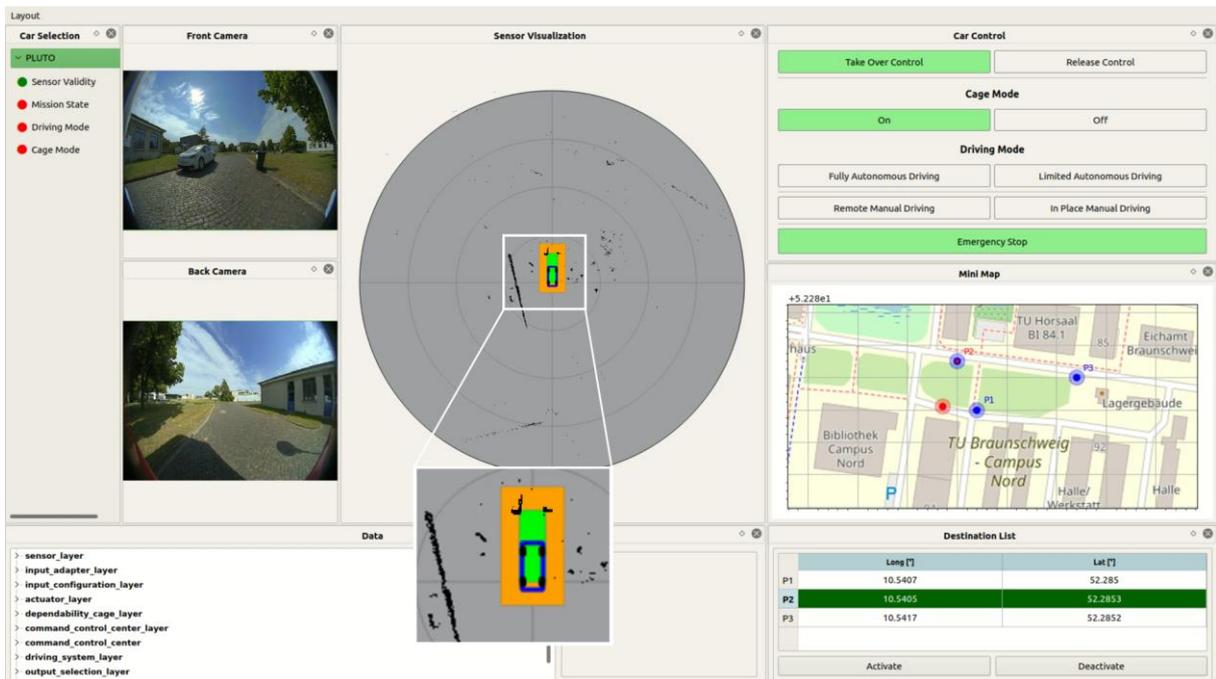


Abbildung 40: Leistand-GUI V2.0 im Szenario „Problemfall: Fahrbahnverengung wegen Hindernisse“.

Abbildung 41 zeigt das Szenario einer verdeckten Kamera aus Sicht der Leistand-GUI V2.0. Es ist zu erkennen, dass die vordere Kamera verdeckt ist und dass die „Sensor Validity“ in Rot visualisiert wurde, was darauf hindeutet, dass es hierbei ein Problem gibt, welches durch den „Dependability Cage“ erkannt wurde und vor Ort beispielweise von einem lokalen Zusteller gelöst werden muss.

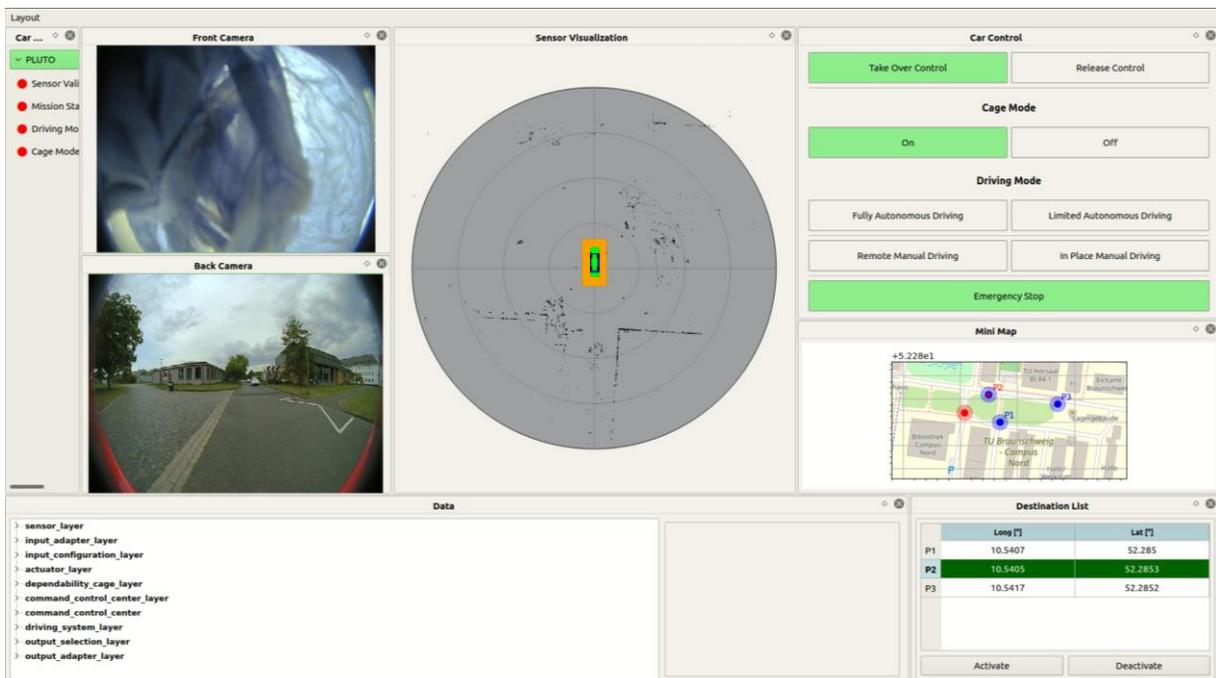


Abbildung 41: Leistand-GUI V2.0 im Szenario „Problemfall: Kameraabdeckung“.

Zusammenfassend konnte nachgewiesen werden, dass der von TUC entwickelte Lösungsansatz zur Verlagerung von Zuständigkeiten in einer übergreifenden Sicherheitsarchitektur bei einer Mensch-Maschine-Kollaboration durch den Leitstand (Remote Command Control Center) und

„Dependability Cage“ die in Abbildung 29 definierten Anwendungsfälle adressieren und bewältigen konnte.

3.8 Kooperation (InES)

Der Fokus dieses Arbeitspakets lag auf der Kooperation zwischen einem Zusteller bzw. dem Depotpersonal und einem autonomen Zustellfahrzeug im betrachteten Rendezvous-Zustellmodus. In diesem Kontext wurden im Rahmen dieses Arbeitspakets vor allem zwei Aspekte der Kooperation betrachtet: Zum einen die mobile Interaktion und Kommunikation des Zustellers mit dem Zustellfahrzeug während der Paketzustellung im Rendezvous-Modus; und zum anderen die intelligente und automatisierte Navigationsassistenz in Form von Routenoptimierungsalgorithmen für das Indoor- bzw. Outdoorrouting. Diese beiden Aspekte werden in den folgenden Unterkapiteln näher betrachtet.

3.8.1 Mobile Interaktion und Kommunikation zwischen Zusteller und autonomem Zustellfahrzeug

Ein zentrales Ziel des Projekts war die Entlastung der Zusteller durch den Einsatz eines intelligenten autonomen Zustellfahrzeugs auf der sogenannten „Last-Mile“ der Paketzustellung. Um dieses Ziel zu erreichen ist eine ständige, effiziente und mobile Interaktion und Kommunikation zwischen Zusteller und autonomem Zustellfahrzeug unabdingbar. Um alle diese Anforderungen zu erfüllen, wurden im Projekt verschiedene Back-End Systeme und eine mobile Applikation als Front-End entwickelt, welche im Folgenden näher beschrieben werden.

Mobile Applikation

Die mobile Applikation (im Folgenden referenziert als „Zusteller-App“) ermöglicht es dem Zusteller, zu jeder Zeit, über ein mobiles Endgerät mit dem Fahrzeug zu interagieren und aktuelle Fahrzeuginformationen einzusehen.

Zusätzlich zu diesen Funktionen unterstützt die Zusteller-App außerdem die Navigation des Zustellers sowohl innerhalb von Gebäudekomplexen (Indoor-Navigation) als auch außerhalb von Gebäuden (Outdoor-Navigation).

Mit fortschreitender Detaillierung der Use Cases ließ sich immer klarer erkennen, dass im Projekt eine Trennung der Zusteller-App in zwei mobile Applikationen sinnvoll ist. Dies ist vor allem auch der geplanten Trennung der Demonstrationsszenarien in ein Outdoor-Szenario, welches eine reale Zustellfahrt mit dem autonomen Motionboard in Braunschweig umfasst, und ein Indoor-Szenario, welches eine Demonstration der Indoor-Navigation in Heidelberg umfasst, geschuldet. Diese (auch geographische) Trennung der Demonstrationsszenarien war aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen an die benötigte Infrastruktur notwendig.

Die erste App, für die maßgeblich das InES verantwortlich war, konzentriert sich vor allem auf die Kommunikation zwischen dem Zusteller und dem autonomen Zustellfahrzeug im Outdoor-Bereich. Dies umfasst unter anderem die Auswahl der nächsten Haltepunkte, die Steuerung von Fahrzeugfunktionen wie beispielsweise Türen öffnen/schließen, sowie das Anzeigen von aktuellen Informationen und Fehlermeldungen bezüglich des Fahrzeugstatus. Daher wird diese Applikation von hier an als „Outdoor-App“ bezeichnet.

Die zweite App, für die maßgeblich der Projektpartner BIT verantwortlich war, konzentriert sich primär auf die Navigation des Zustellers nach Verlassen des Fahrzeugs. Der Fokus liegt hierbei auf einer übergangslosen Outdoor-Indoor Navigation des Zustellers, wobei gezeigt werden sollte, wie unterschiedliche Systeme der Lokalisierungstechnologie Standortinformationen gebündelt auf einem Frontend darstellen. Explizit dient diese „Indoor-App“ der Integration und Visualisierung der verwendeten Deep Map™ Technologien.

Für beide Applikationen fiel die Wahl der mobilen Plattform auf Android. Ein wesentlicher Grund hierfür war, dass der Verbundkoordinator DPD in der Paketzustellung Android-basierte

Handhelds nutzt. Außerdem kommen im Industriekontext vorrangig Android-Geräte zum Einsatz. Des Weiteren wurde für die Entwicklung von beiden Applikationen die offizielle Google-Entwicklungsumgebung „Android Studio“ sowie die Programmiersprache Kotlin verwendet. Darüber hinaus sind beide Applikationen auch im Bereich des User Interfaces, dessen grundlegendes Design in Kooperation aller beteiligten Projektpartner mithilfe von verschiedenen Artefakten und Techniken (z.B. klickbaren Prototypen und Design Workshops) erarbeitet wurde, immer noch ähnlich. Die Unterschiede liegen hauptsächlich im Backend, wo teilweise unterschiedliche Systeme angeschlossen werden und die Projektpartner ihren jeweiligen Fokus vertiefen können.

Outdoor App - Initial wurde ein erster Prototyp der Outdoor-App entwickelt, welcher dann mit dem Fortschreiten des Projekts und der damit einhergehenden finalen Abstimmung der Demonstrationsszenarien und Schnittstellen iterativ weiterentwickelt wurde. Dabei wurde der entstandene Prototyp auch zur Verwertung im Rahmen von Lehrveranstaltungen eingesetzt. Der entwickelte Prototyp unterstützt dabei im wesentlichen folgende Anwendungsfälle:

- Anzeigen der aktuellen Position des Zustellfahrzeugs
- Anzeigen der aktuellen Position des Zustellers
- Manuelles Auswählen des nächsten Haltepunktes
- Anzeigen eines optimalen, automatisch berechneten nächsten Haltepunktes
- Anzeigen der Position der nächsten Zustellung
- Markieren einer Zustellung als erfolgreich/nicht erfolgreich
- Anzeigen einer Liste aller Zustellungen
- Anzeigen von Fehlermeldungen und allgemeinen Zustandsinformationen des Fahrzeugs

Diese Anwendungsfälle wurden aufgrund einer genauen Anforderungsanalyse, die sich aus einem typischen Tagesablauf eines Paketzustellers ergibt, abgeleitet. Im Gegensatz zu der Indoor-App, welche sich zum Anzeigen von Positionen auf das von der BIT entwickelte Deep Map™ Framework stützt, wurde hierfür in der Outdoor-App MapBox, ein bereits existierendes Standardframework zum Arbeiten mit Kartenmaterial, verwendet. Abbildung 42: Screenshots des Outdoor-App-Prototyps. Abbildung 42: Screenshots des Outdoor-App-Prototyps. zeigt einige Screenshots des Prototyps der Outdoor-App.

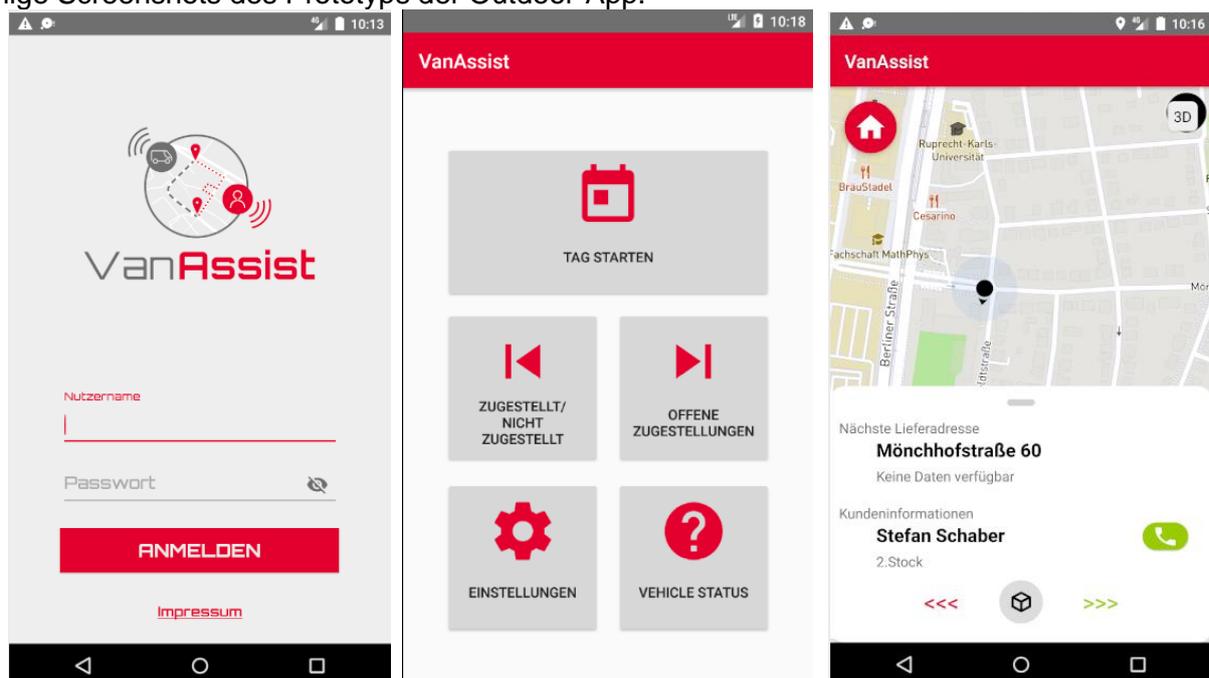


Abbildung 42: Screenshots des Outdoor-App-Prototyps.

Da die mobile Applikation hauptsächlich der Interaktion und Kommunikation zwischen Zusteller und Zustellfahrzeug dient, muss diese natürlich auch die erforderlichen Kommunikationsschnittstellen zur Verfügung stellen. Im Fall der Outdoor-App sind dies im Wesentlichen zwei Schnittstellen zu anderen Komponenten im Gesamtsystem: Zum einen ist das eine Schnittstelle zum Logistiksystem, welche später Teil des Logistikzentrums ist und sowohl die Aufgabe hat, die für die Zustellung relevanten Logistikdaten (Paketdaten, Fahrzeugdaten, Personaldaten etc.) zu verwalten als auch eine optimale Zustellroute für eine Paketzustellung im Rendezvous-Modus zu berechnen und zur Verfügung zu stellen, und zum anderen eine Schnittstelle zum Fahrzeugsystem, um sowohl Steuerbefehle zum Fahrzeug zu schicken als auch Informationen über den aktuellen Fahrzeugzustand abzurufen.

Laut Gesamtsystemarchitektur läuft die Kommunikation über diese Schnittstellen später gesammelt über die SBox, welche bereits in Kapitel 3.5 näher beschrieben wurde und über BLE mit dem mobilen Endgerät des Zustellers verbunden ist. Da zu Beginn der Entwicklung des Prototyps der Outdoor-App, die SBox noch nicht zur Verfügung stand, wurde die Kommunikation zum Logistiksystem und zum simulierten Fahrzeugsystem zunächst direkt über eine REST-Schnittstelle abgebildet. In folgenden Iterationsschritten wurde durch die HSO eine BLE-Spezifikation erarbeitet, entsprechend implementiert und, zunächst in enger Abstimmung mit dem Partner BIT, eine Integration der BLE-Schnittstelle in die Indoor-App durchgeführt. Darauf aufbauend erfolgte die Integration mit der Outdoor-App des InES.

Indoor-App - Auch der Prototyp der Indoor-App wurde entsprechend der im Projekt erarbeiteten Schnittstellenspezifikationen und Demonstrationsszenarien in mehreren Iterationszyklen entwickelt. Die Indoor-App bildet dabei vor allem das Indoor-Szenario ab und dient der Integration und Visualisierung der verwendeten Deep Map™ Technologien, welches hauptsächlich durch das Anbinden der RTLS-Hub Schnittstelle (Real Time Location Service) umgesetzt wurde. Durch diese Schnittstelle wird es der Indoor-App ermöglicht, die Position des Paketzustellers (auch innerhalb von Gebäudekomplexen) über diverse Verortungstechnologien zu erkennen, zu bündeln und als Blue Dot auf der Deep Map™ darzustellen. Dabei kamen im Projekt vor allem GPS, kontakt.io Beacons und Ultra Wideband (UWB) als Verortungstechnologien zum Einsatz. Abbildung 31 zeigt eine schematische Darstellung der Schnittstelle zwischen RTLS-Hub, Verortungstechnologien und Indoor-App.

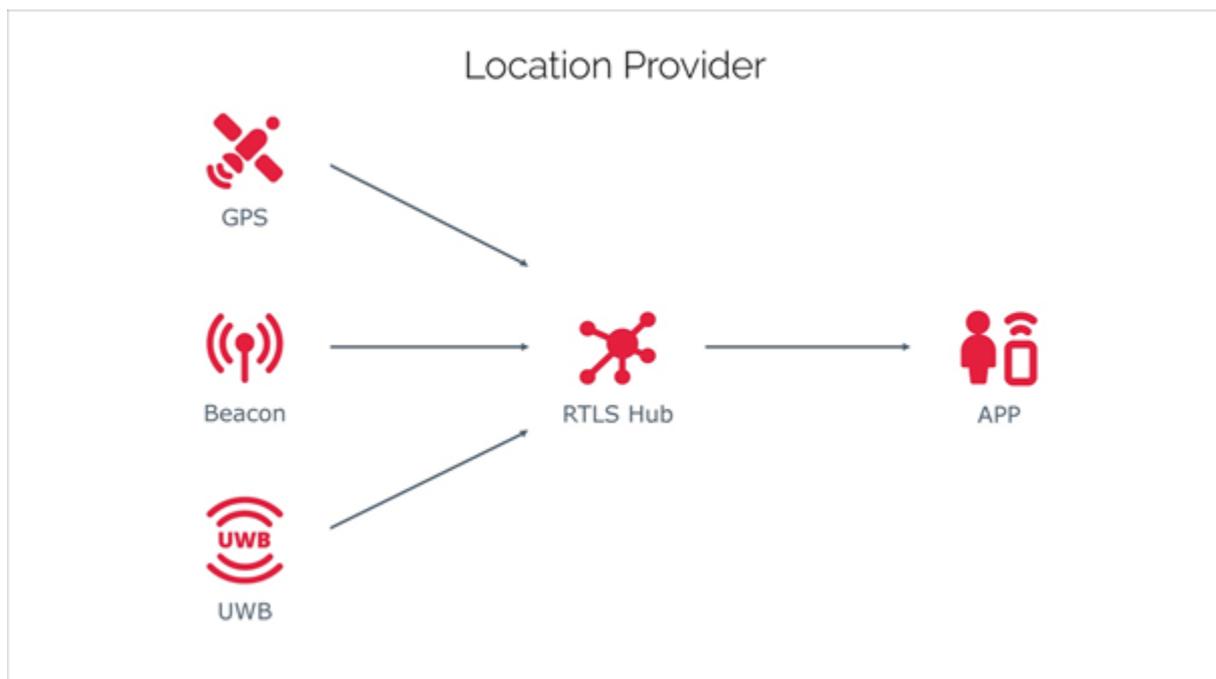


Abbildung 43: Gewählte Location Provider für die Verortung des Zustellers.

Neben dieser Schnittstelle zum RTLS-Hub, welche explizit für die Indoor Verortung des Zustellers benötigt wird, implementiert die Indoor-App im Wesentlichen auch die benötigten Teile der beiden Schnittstellen zum Logistiksystem und zum Fahrzeugsystem, welche bereits im Kontext der Outdoor-App beschrieben wurden. Weitere Details zu den verwendeten Deep Map™ und Verortungstechnologien befinden sich außerdem im gesonderten Abschlussbericht der BIT.

Logistikzentrum - Die Hochschule Offenburg befasste sich in AP8 insbesondere mit der klaren Definition und Implementierung der Abläufe innerhalb des Logistikzentrums, welches für die Koordination der Kommunikation im Gesamtsystem verantwortlich ist und außerdem den aktuellen Zustand des Zustellszenarios verwaltet. Hier wurden Abläufe definiert und in den Services implementiert, die für die Umsetzung des VanAssist Use-Cases essenziell sind.

Hierunter fällt z.B. der Ablauf eines Zustellszenarios, wie es in Abbildung 44 dargestellt ist. Hier wurden die einzelnen Zustellphasen fein untergliedert und entsprechen in den Backend-Services implementiert. Das Fahrzeug durchläuft während des Zustell-Tages verschiedene Phasen:

- Zu Beginn wird es von einem Techniker kontrolliert und freigegeben.
- Anschließend wird es von der Leitstelle autonom zu einer Laderampe geschickt, wo es beladen wird. Das Fahrzeug steht nun unter der Kontrolle des Depot-Personals.
- Ist die Beladung erfolgt, gibt das Depot-Personal das Fahrzeug frei. Die Leitstelle übernimmt wieder die Kontrolle und schickt das Fahrzeug zu einem Treffpunkt.
- Am Treffpunkt angekommen übernimmt der Zusteller die Steuerung, bis seine Tour abgeschlossen ist.
- Ist die Tour abgeschlossen geht die Kontrolle zurück an die Leitstelle. Diese schickt das Fahrzeug zurück zur Entladung.
- Die Kontrolle wechselt wieder zum Depot-Personal und das Fahrzeug wird entladen.
- Wurde das Fahrzeug entladen geht die Kontrolle zurück an die Leitstelle, die es auf einen Parkplatz oder zu einer Ladesäule schickt.

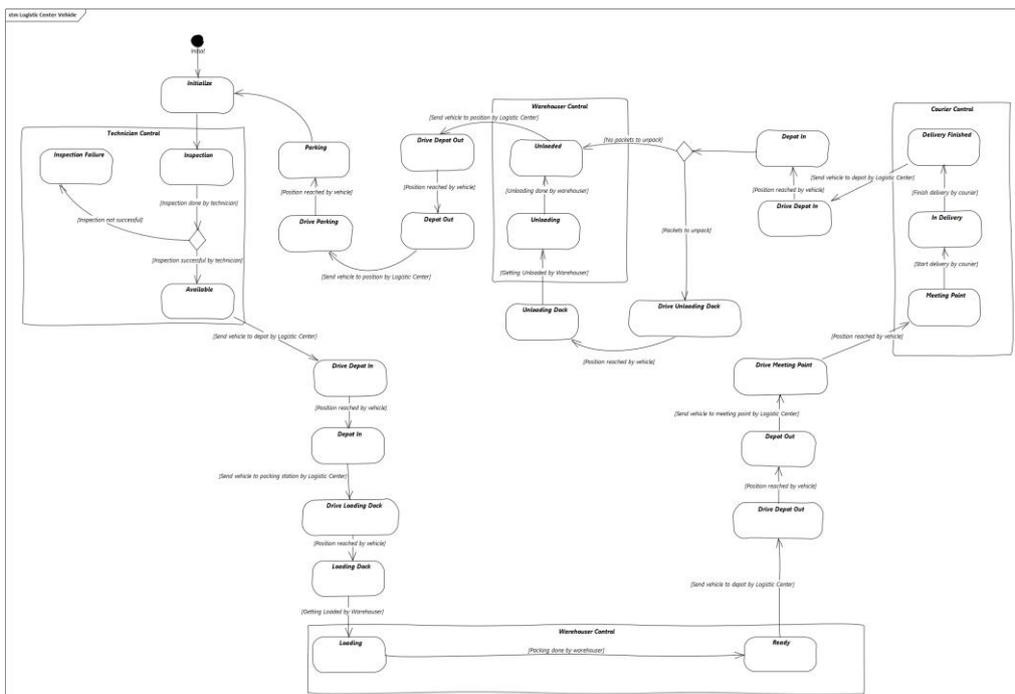


Abbildung 44: Ablauf eines Zustelltages aus Sicht des Fahrzeugs.

Logistiksystem - Im Kontext des Logistikzentrums wurde durch das InES auch für das bereits erwähnte Logistiksystem, welches als Teilservice in das Logistikzentrum integriert wurde, zuerst ein initialer Prototyp entwickelt, welcher mit dem Fortschreiten des Projekts iterativ weiterentwickelt und an die Anforderungen des geplanten Demonstrationsszenarios und der finalen Schnittstellenspezifikationen angepasst wurde. Auch dieser Prototyp wurde durch den Einsatz in der Lehre verwertet. Dieser Prototyp stellt im Wesentlichen eine REST-Schnittstelle zur Verfügung, über welche relevante Logistikdaten sowie relevante Informationen über die automatisch berechnete Zustellroute abgerufen werden können. Für die Entwicklung des Prototyps wurde die Programmiersprache Python verwendet. Der wichtigste Grund für diese Entscheidung ist, dass Python inzwischen zu einer der meistgenutzten Programmiersprachen zum Implementieren aktueller Ansätze des Maschinellen Lernens geworden ist. Da viele aktuelle Routenoptimierungsansätze auf solchen Ansätzen des Maschinellen Lernens basieren, erleichtert das Verwenden von Python die Integration von solchen Optimierungsansätzen in das Logistiksystem erheblich.

Fahrzeugsimulation - Da zum Zeitpunkt der Entwicklung des ersten Prototyps der Outdoor-App noch kein reales Fahrzeugsystem zur Verfügung stand, wurde dieses zunächst durch eine Fahrzeugsimulation abstrahiert, um somit bereits die Möglichkeit zu erlangen, die Funktionalitäten der Outdoor-App sowie die Kommunikation zwischen Outdoor-App und Fahrzeugsystem, testen zu können. Die Fahrzeugsimulation wurde dabei basierend auf dem Open-Source Projekt „Simulation of Urban Mobility“ (SUMO) aufgebaut. Wie bereits erwähnt, wurde auch die Kommunikation zwischen mobiler Applikation und des simulierten Fahrzeugsystems zunächst über eine REST-Schnittstelle abgebildet. Wie auch die Prototypen der Outdoor-App und des Logistiksystems, wurde die Fahrzeugsimulation im Laufe des Projekts in einigen Iterationszyklen weiterentwickelt und an die Anforderungen des Demonstrationsszenarios und der finalen Schnittstellenspezifikationen aus AP2 angepasst.

Kooperation mit dem Fahrzeugsystem - Auf Seiten des Fahrzeugsystems wurde durch die HSO die auf dem Data Distribution Service (DDS) basierende Spezifikation implementiert. Hierzu wird auf der VBox das ROS-Framework genutzt, welche als gemeinsame Basis zwischen den Partnern definiert wurde.

Kooperation mit dem Map-Server - Für das autonome Fahren werden hochgenaue digitale Karten benötigt. Um diese Kartendaten, durchgängig aktuell halten zu können, wurde durch die HSO eine Schnittstelle zwischen dem Logistikzentrum und dem Map-Server der IAV geschaffen. Diese basiert, wie auch die anderen Zugriffspunkte von außen, auf einer REST Schnittstelle. Mit deren Hilfe ist es möglich, die Kartendaten auf dem Fahrzeug aktuell zu halten.

3.8.2 Intelligente Navigationsassistentz

Der zweite große Fokus, der im Projekt in diesem Arbeitspaket betrachtet wurde, ist eine intelligente Navigationsassistentz des Zustellers. Für solch eine Navigationsassistentz werden im Wesentlichen zwei Bausteine benötigt. Zum einen die optimale Berechnung von Zustellrouten, und zum anderen die übersichtliche Darstellung dieser berechneten Routen für den Zusteller. In VanAssist ist der zweite Baustein bereits in der im vorherigen Unterkapitel beschriebenen mobilen Applikation des Zustellers enthalten.

Im Kontext des ersten Bausteins, der optimalen Berechnung von Zustellrouten, wurden im Projekt hauptsächlich zwei Aspekte betrachtet: Zum einen die Berechnung einer optimalen Abfolge von Haltepunkten, an denen sich der Zusteller mit dem Zustellfahrzeug bei einer Zustellung im Rendezvous-Modus trifft und der damit verbundenen Festlegung, ob der Zusteller die Wege zwischen zwei Haltepunkten zu Fuß oder gemeinsam mit dem Fahrzeug zurücklegt (von hier an referenziert als „Outdoor-Routenoptimierung“); und zum anderen die Berechnung von optimalen Routen zwischen den verschiedenen Haltepunkten, falls diese zu Fuß zurückgelegt werden (von hier an referenziert als „Indoor-Routenoptimierung“). Dabei wurde beim

zweiten Aspekt, für den hauptsächlich die BIT verantwortlich war, der Fokus speziell auf die Indoor-Navigation an sich und den nahtlosen Übergang zwischen Indoor- und Outdoor-Navigation gelegt.

Indoor-Routenoptimierung - Im Rahmen des Forschungsprojekts konnte ein alternativer Ansatz zum bestehenden Seamless Indoor-Outdoor Routing in Deep Map™ untersucht und implementiert werden. Die bestehende Lösung, basierend auf der Berechnung von Mittellinien („Centerline-Ansatz“), hat ihre Stärken vor allem im Eventbereich mit Hallenplänen, die regelmäßig angeordnete Stände mit klaren Fußwegen dazwischen aufweisen. Ein alternativer Ansatz auf Basis der Berechnung eines Sichtbarkeitsgraphen („Visibility Graph“-Ansatz) konnte untersucht werden und erwies sich als vielversprechend für eine bessere Unterstützung von Routing innerhalb komplexer Gebäudestrukturen ohne vorgegebene Wegführung. Desweiteren erlaubt der neue Ansatz eine vollautomatische Erstellung des Routinggraphen aus den bestehenden Gebäudegeometrien und somit eine deutliche Reduktion des Arbeitsaufwandes gegenüber dem bestehenden halbautomatischen Ansatz. Auch die Performance des neuen Ansatzes wurde untersucht und erwies sich als deutlich langsamer, jedoch immer noch performant genug für Echtzeitrouting, da der frei begehbare Bereich in Gebäuden verglichen mit Outdoor Routing klein bleibt. Für größere Projekte und komplexere Szenarien ist ebenso eine Kombination beider Ansätze möglich.

Outdoor-Routenoptimierung - Das im Kontext des ersten Aspekts, der in VanAssist betrachteten Routenoptimierung betrachtete Optimierungsproblem, unterscheidet sich signifikant von den Varianten des „Vehicle Routing Problems“ (VRP) welche bisher in der wissenschaftlichen Literatur betrachtet wurden. Die Besonderheiten des im Projekt betrachteten Optimierungsproblems ergeben sich vor allem aus dem neuartigen Rendezvous-Zustellmodus, welcher zusätzliche Entscheidungen bezüglich der Kooperation von Zusteller und Fahrzeug (z.B. wo treffen sich Fahrzeug und Zusteller, welche Strecken legen Fahrzeug und Zusteller gemeinsam/getrennt zurück etc.) erfordert. Auf Grundlage der Recherche zu geeigneten Maschinellen Lernverfahren wurde ein heuristischer Lösungsansatz für das betrachtete Optimierungsproblem entwickelt. Dieser Lösungsansatz beruht auf der Kombination von sogenannten „Pointer Networks“ (PNs) und (Bidirektionalen) Rekurrenten Neuronalen Netzwerken. Dabei wird das PN verwendet um das zugrundeliegende „Traveling Salesman“ Problem (TSP) zu lösen und das Rekurrente Neuronale Netzwerk trifft auf Basis dieser (Teil-) Lösung eine Entscheidung darüber, welche Strecken Zusteller und Fahrzeug gemeinsam bzw. getrennt zurücklegen, wodurch auch definiert wird, wo sich Fahrzeug und Zusteller erneut treffen. Der Ansatz kann außerdem in Kombination mit bestärkendem Lernen verwendet werden. Der Vorteil von bestärkendem Lernen gegenüber überwachtem Lernen ist, dass keine exakten Lösungen von Beispielinstanzen des betrachteten Problems benötigt werden, was angesichts der Komplexität des in VanAssist betrachteten Optimierungsproblems sehr relevant ist.

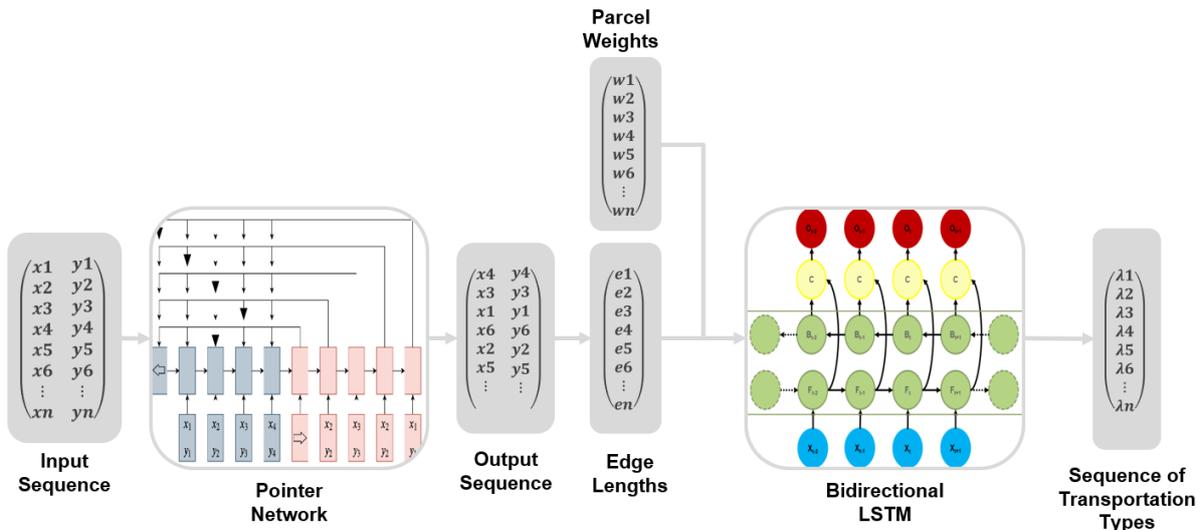


Abbildung 45: Schematische Darstellung der ersten Version des Routenoptimierungsansatzes.

Es wurden drei verschiedenen Varianten dieses heuristischen Lösungsansatzes prototypisch implementiert und wissenschaftlich evaluiert. Eine genauere Beschreibung der Ergebnisse dieser Evaluation finden sich in Kapitel 3.10. Die verschiedenen implementierten Varianten des Optimierungsansatzes unterscheiden sich vor Allem durch die Art wie die verwendeten Lernverfahren miteinander kombiniert wurden. Abbildung 45 und Abbildung 46 zeigen eine schematische Übersicht von den zwei vielversprechenderen Varianten.

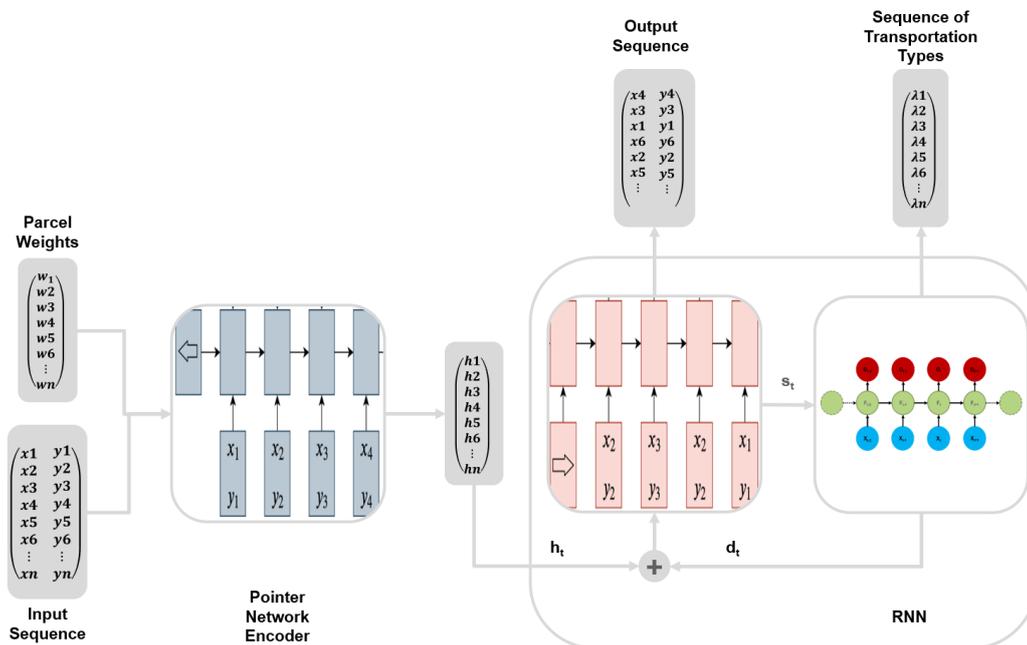


Abbildung 46: Schematische Darstellung der zweiten Version des Routenoptimierungsansatzes.

3.9 Systemintegration (IfF)

Das **Institut für Fahrzeugtechnik der TU Braunschweig (IfF)** war in AP9 für die Systemintegration der in AP6 vorgestellten automatisierten Fahrfunktion verantwortlich und unterstützte die Integrationen der fahrzeugbezogenen Partnersysteme in den Versuchsträger.

Die in AP6 vorgestellten Fahrfunktionen konnten dabei entsprechend der Funktionsarchitektur weitestgehend erfolgreich in den Versuchsträger implementiert werden. Generell erfolgte die Implementierung auf der in AP4 vorgestellten Toolkette der Rapid-Control-Prototyping

Plattform. Dies umfasste sowohl die Programmierung der Funktion in Form eines Matlab/Simulink-Modells, welches dann als C-Code auf das Echtzeit-System geladen wird, als auch die Schaffung von Schnittstellen zu Partnersystemen. Die Schnittstelle zum Versuchsträger (CAN) als auch der Aufbau des Sicherheitskonzepts durch Nutzung eines CAN-Gateways wurden bereits in AP4 vorgestellt. Diese Schnittstellen konnten erfolgreich implementiert und getestet werden.

Darüber hinaus wurden grafische Benutzeroberflächen zur Bedienung des Systems geschaffen (siehe beispielhaft Abbildung 47), welche auch Visualisierungen des Systemzustandes umfassen und für die Datenaufnahmen genutzt werden können. Hierüber ist eine schnelle Fehlerbehebung und Weiterentwicklung der automatisierten Fahrfunktion im Versuchsträger möglich.

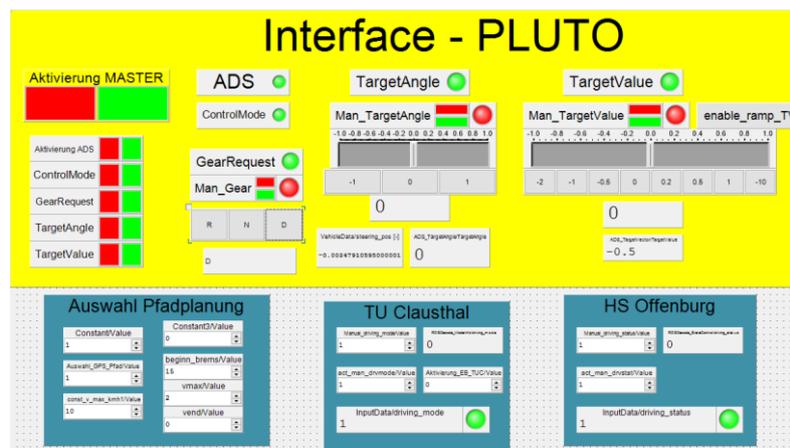


Abbildung 47: GUI zur Aktivierung des automatisierten Fahrsystems.

Weiterhin konnten die Elemente des externen HMIs in die Toolkette integriert werden. Das Display kann dabei direkt aus dem ADS-System über die vorgestellte grafische Benutzeroberfläche angesteuert werden. Zur Ansteuerung der LEDs wird hingegen ein Microcontroller eingesetzt. Dieser wird per serieller Schnittstelle mit dem ADS-System verknüpft und steuert nach Auswertung der erhaltenen Informationen die LEDs an. Dieses Interface konnte ebenfalls erfolgreich implementiert werden, womit alle in AP6 vorgestellten Situationen durch das externe HMI am realen Versuchsträger abgebildet werden können. Die Funktionalitäten wurden zusätzlich um Fahrtrichtungsanzeiger („Blinker“) sowie ein Bremslicht (rote LEDs am Heck) ergänzt.

Die in AP6 vorgestellten Neuentwicklungen des Freiraumplaners sowie des krümmungsoptimierten Pfadplaners konnten ebenfalls erfolgreich auf dem Versuchsträger implementiert werden. Für den vorgestellten „lokalen Pfadplaner“ erfolgte eine erfolgreiche Erstimplementierung auf einem konventionellen Versuchsträger. Auf eine Implementierung im Versuchsträger PLUTO wurde aufgrund der Nichtnotwendigkeit zur Darstellung der Use-Cases verzichtet.

Wie aus den Ausführungen in den vorherigen APs deutlich wird, besteht ein akuter Bedarf zur Kommunikation der verschiedenen Partnersysteme untereinander. Für die im Fahrzeug verbauten Systeme erfolgte diese Kommunikation maßgeblich durch ein Netzwerk unter Nutzung von ROS2 (DDS) als Middleware, siehe Abbildung 48.

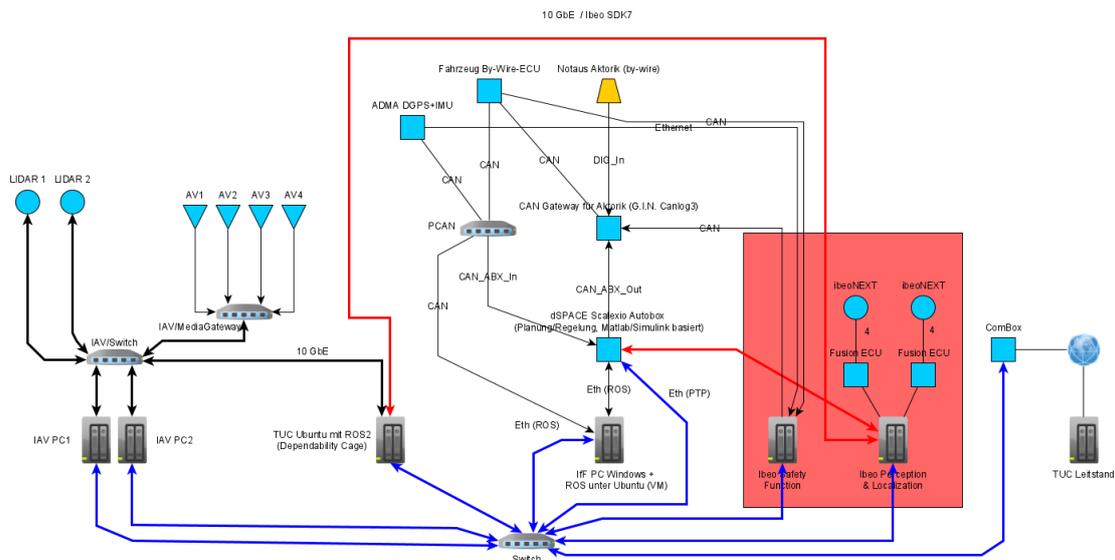


Abbildung 48: Vernetzungsplan der Partnersysteme im Fahrzeug.

Zur Kommunikation zwischen den beteiligten Systemen wurden entsprechende Botschaften (.msg-Dateien) definiert und auf den beteiligten Partnersystemen erfolgreich implementiert. Das vorgestellte Netzwerk zur Kommunikation zwischen allen Partnersystemen wurde um zusätzliche Netzwerke zum Austausch von Sensorrohdaten ergänzt. Die Separierung erfolgte aufgrund der hohen Datenraten und des häufig nur bilateralen Austauschs der Daten, vgl. auch AP6/7.

Die für TUBS/IfF maßgeblichen Informationsflüsse innerhalb des ROS2-Netzwerks stellten dabei den Empfang relevanter Missionsinfos (Zielposition, ...) durch die verbaute ComBox der HSO („Schnittstelle zur Außenwelt“) sowie fahrzeugintern die Verknüpfung zum System der TU Clausthal und den Lokalisierungsinfos der IAV dar. Gleichzeitig stellte das System der TU Braunschweig den Partnersystemen im Wesentlichen Informationen über die Fahrzeugodometrie, den Systemstatus und die geplante Trajektorie zur Verfügung. Wie bereits dargestellt, wurden die Sensorinformationen separat empfangen.

Abbildung 49 zeigt den Rumpf des Fahrzeugs, welcher alle im Fahrzeug verbauten Systeme zeigt. Die verbaute Sensorik sowie das Gesamtfahrzeug wurden bereits in AP4 vorgestellt. Seitens IfF wurde außerdem das Powermanagement zur Versorgung aller Systemen ausgelegt.

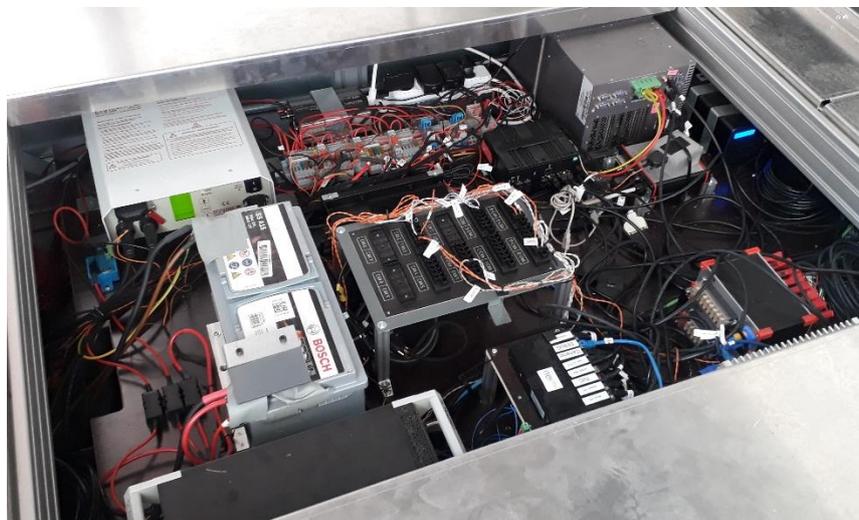


Abbildung 49: Fahrzeuggroup mit verbauten Systemen.

Ibeo hat sich innerhalb des AP9 mit der Inbetriebnahme des Perzeptions- sowie Absicherungssystems beschäftigt. Da die Genauigkeit der gefertigten Sensorhalterungen und die Genauigkeit des Einbauprozesses, insbesondere Ungenauigkeiten in der Rotation der Sensorik, nicht ausreichte, um eine hochgenaue Lokalisierung und Objekterkennung durchzuführen, wurde die Ibeo-Sensorik im eingebauten Zustand vor Ort kalibriert. Das Kalibrierungsverfahren wurde von Ibeo entwickelt und erfordert keine teure Ground-Truth Sensorik, sondern kann mit einfachen Mitteln vor Ort durchgeführt werden. Es handelt sich dabei um eine Absolutkalibrierung des vorderen und hinteren Sensors (siehe Abbildung 50, grün) mit anschließender Kreuzkalibrierung der übrigen Sensorik. Für dieses Verfahren ist es zwingend notwendig, dass sich die Sensorbereiche stets überlappen. Dies ist in Abbildung 50 ebenfalls erkennbar.

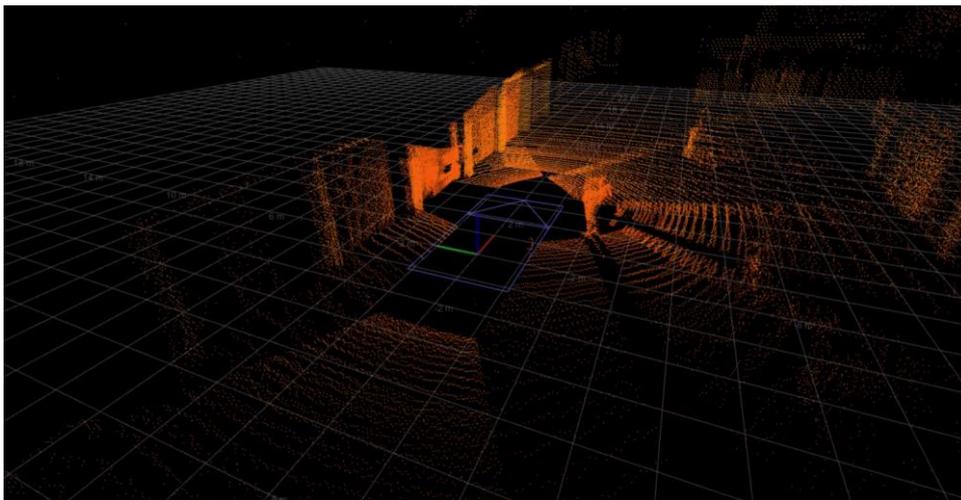


Abbildung 50: Kalibrierte Punktwolke.

Abbildung 50 zeigt eine Visualisierung der kalibrierten Punktwolke im Außenbereich am Niedersächsischen Forschungszentrum Fahrzeugbau (NFF) in Braunschweig. Die blaue Box visualisiert die Dimensionen des Fahrzeuges. Das Koordinatensystem (rot: x-Achse, grün: y-Achse) liegt auf der Mitte der Hinterachse. Rechts vom Fahrzeug (negative y-Achse) ist eine stehende Person zu erkennen. Rechts vor dem Fahrzeug ist das Heck eines parkenden Fahrzeuges zu sehen. Links vom Fahrzeug befindet sich das Gebäude.

Die Schnittstellen des Perzeptionspaketes auf dem VanAssist Fahrzeug wurden integriert und getestet. Es wurde ein GNSS-System zur Initialisierung der Lokalisierung per Ethernet verbunden. Fahrzeugodometriedaten werden per CAN empfangen.

Die Schnittstellen des Absicherungssystems, welches das AEB auslösen kann, wurden integriert und getestet. Es werden die Objektdaten und die Lokalisierung vom Ibeo Perzeptionssystem via Ibeo SDK empfangen. Die Schnittstelle zur Komfortfahrfunktion der TU Braunschweig wird mittels Konverter über ROS2 umgesetzt. Das Absicherungssystem empfängt so die geplante Trajektorie und die geplanten Fahrbefehle, um sie gegenzuprüfen und ggf. ein AEB auszulösen.

Die **Hochschule Offenburg** war innerhalb des AP9 für die Implementierung der Systemübergreifenden Kommunikation verantwortlich. Aus den bisherigen Ausführungen wird bereits deutlich, dass die Kommunikation als zentrale Komponente, die mit mehreren Schnittstellen interagieren muss, eine wichtige Rolle einnimmt. Die folgenden Komponenten und Schnittstellen wurden seitens der Hochschule Offenburg implementiert und integriert:

Integration der HSO-internen Komponenten für die Kommunikation

- SBox - Logistikzentrum
- Logistikzentrum - Leitwarte
- Leitwarte - VBox

Integration der Komponenten der anderen Projektpartner

- SBox – Smartphone (BIT, UMA)
- Logistikzentrum – Routenplanung (UMA)
- VBox – Fahrzeug (TUB)
- HSO-Leitwarte - TUC-Leitwarte (TUC)
- HSO-Leitwarte – IAV Map-Server

Die Integration sowohl der internen als auch der externen Komponenten wurde erfolgreich abgeschlossen. Abbildung 51 zeigt die finale Systemarchitektur nach der Integration.

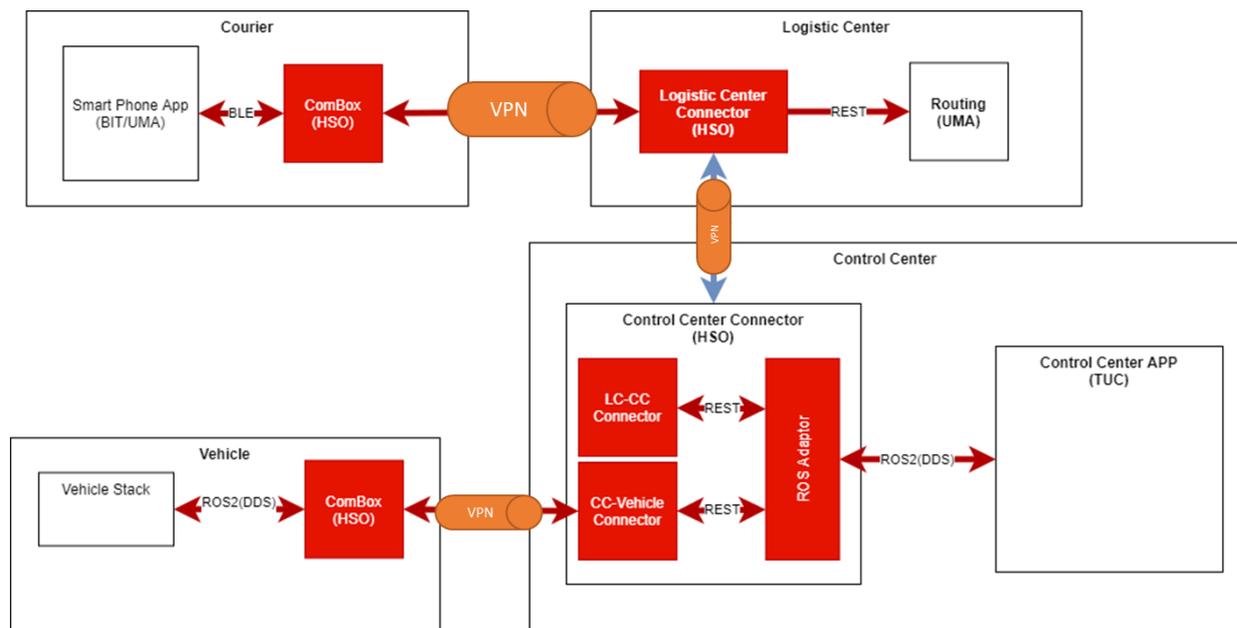


Abbildung 51: Systemarchitektur nach der Integration.

Im Rahmen vom AP9 hat **TUC** TAP-TUC-9.1, TAP-TUC 9.2 und TAP TUC-9.3 bearbeitet. In diesen APs wurde, nachdem der Industrie PC erfolgreich in die Gesamtvernetzung integriert und in Betrieb genommen wurde, die im TUC Labor erprobte Implementierung mit dem Modellfahrzeug an das Zielsystem (Motionboard) angepasst. Zusätzlich unterstützte TUC die Projektpartner bei der Systemintegration.

Zur Anpassung der Implementierung wurden mehrere Adapter geschrieben, mit denen Sensorik und die Kommunikation zum Leitstand integriert wurden. Kameradaten von IAV konnten durch die Middleware ROS2 integriert werden. Messdaten von TUBS/lff (Geschwindigkeit, Lenkwinkel, GPS-Position) konnten ebenfalls durch die Middleware ROS2 integriert werden. Zur Kommunikation mit dem Leitstand konnte auch die Middleware ROS2 verwendet werden. LiDAR-Daten des Projektpartners Ibeo konnten mit Hilfe des Ibeo-SDKs gelesen und verwendet werden. Um den Dependability Cage an die veränderte Hardware anzupassen, wurde ein integrierter View der LiDAR-Daten erzeugt, da anstelle eines LiDAR Sensors, acht LiDAR Sensoren installiert wurden. Zudem wurde ein Clustering Verfahren integriert, mit dem unkritische Ghostingpoints eliminiert werden konnten. Weiterführend wurde der Transfer der LiDAR-Daten zum Leitstand von Punktwolken auf Bilder umgestellt, um den Kommunikationsaufwand zu verringern. Darüber hinaus wurden Applikationsparameter des „Dependability Cages“ an das Zielsystem (Motionboard) angepasst. Dies erfolgte durch mehrere Tests in der Fahrzeughalle des NFF (Hermann-Blenk-Straße 42, 38108 Braunschweig) und dem Testgelände (Bienroder Weg 95, 38106 Braunschweig).

Um den Leitstand V2 mit den Dependability Cage und dem Logistikzentrum über die Kommunikationsinfrastruktur zu integrieren, wurden zusätzliche Adapter erstellt. In Richtung des

„Dependability Cages“ konnte die Integration über die Middleware ROS2 erfolgen. Um den Leitstand mit dem Logistikzentrum zu integrieren, wurden Adapter erstellt, die REST Nachrichten in ROS2 Nachrichten umwandeln und vice versa.

Die Integration des „Dependability Cages“ und des Leitstands wurde durch mehrere Tests in der Fahrzeughalle des NFF und dem Testgelände erfolgreich überprüft.

InES adressierte im AP9 die Systemintegration der mobilen Applikation. Wie bereits in Kapitel 3.8.1 erwähnt, ist in der Gesamtsystemarchitektur vorgesehen, dass die gesamte Kommunikation der mobilen Applikation mit anderen Komponenten des Gesamtsystems über die sogenannte SBox, welche von der HSO entwickelt und zur Verfügung gestellt wurde, läuft. Dabei ist vorgesehen, dass sich das mobile Endgerät, auf welchem die mobile Applikation ausgeführt wird, automatisch über eine BLE Verbindung mit der SBox verbindet und authentifiziert, um so mit den anderen Komponenten des Gesamtsystems kommunizieren zu können. Um dies zu ermöglichen, wurde zunächst von der BIT, auf Basis von Kotlin Coroutines und Kotlin Fows, mit der Entwicklung einer BLE Bibliothek für Android begonnen, welche die nötigen Funktionen zur Kommunikation über die spezifizierte BLE Schnittstelle zwischen SBox und mobiler Applikation zur Verfügung stellt. Nach dem Projektabschluss der BIT ging die Verantwortung für die funktionale Weiterentwicklung der BLE Bibliothek an das InES über. Nachdem die Entwicklung der Bibliothek abgeschlossen war, wurde diese außerdem erfolgreich in die bestehende Outdoor-App integriert. Neben der mobilen Applikation, wurde auch die ursprünglich direkt genutzte REST-Schnittstelle des Logistiksystems erfolgreich mit dem Logistikzentrum der HSO integriert, um so die Kommunikation zwischen Smartphone und Logistiksystem zu ermöglichen.

Außerdem hat sich die bereits in Kapitel 3.8.1 beschriebene Fahrzeugsimulation auch im Rahmen der Gesamtsystemintegration als sehr hilfreich erwiesen. Obwohl es aufgrund des Ausstiegs von VW Nutzfahrzeuge zu signifikanten Verzögerungen beim Aufbau des Fahrzeugsystems gekommen ist, konnte durch die Verwendung der Fahrzeugsimulation bereits frühzeitig mit der Integration der mobilen Applikation und des Logistiksystems mit dem Kommunikationssystem der HSO begonnen und erste Tests dieses teilintegrierten Systems durchgeführt werden. Hierzu wurde die bereits bestehende REST-Schnittstelle der Fahrzeugsimulation so angepasst, dass sie der spezifizierten Schnittstelle zwischen der VBox und dem realen Fahrzeugsystem entspricht. Anschließend konnte dann die VBox mit der so modifizierten Schnittstelle der Fahrzeugsimulation erfolgreich integriert werden.

3.10 Systemtest & Evaluierung (DPD)

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes, wurden zwei der prototypisch implementierten Varianten des Routenoptimierungsansatzes (siehe Kapitel 3.8.2) getestet und wissenschaftlich evaluiert. Die Ergebnisse dieser Evaluation wurden außerdem in Form einer wissenschaftlichen Veröffentlichung von **InES** mit dem Titel „Rendezvous Delivery: Utilizing Autonomous Electric Vehicles to Improve the Efficiency of Last Mile Parcel Delivery in Urban Areas“ im Rahmen der 19th International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2021) veröffentlicht. Die Ergebnisse der Evaluation haben gezeigt, dass alle evaluierten Varianten des Optimierungsansatzes in der Lage sind, das im Projekt betrachtete Optimierungsproblem sehr effizient und mit guter Performanz zu lösen. Außerdem zeigen die Evaluationsergebnisse, dass der in VanAssist betrachtete Rendezvous-Zustellmodus eine signifikante Steigerung der Effizienz bezüglich der benötigten Zeit, um eine Zustelltour abzuschließen gegenüber des „konventionellen“ Zustellmodus ermöglicht. Außerdem wurden funktionale Tests der integrierten Schnittstellen zwischen Zusteller-App, SBox und Logistikzentrum erfolgreich durchgeführt.

Anhand der identifizierten Anforderungen aus AP2 wurden entsprechend Testszenarien der Emergency Brake Funktionalität von **lbeo** identifiziert. Hierbei wurde durch die Identifikation von insgesamt 19 Test Cases eine Abdeckung der implementierten Funktionalität erreicht. Für jedes Testszenario wurde der relevante Parameterbereich aller signifikanten

Umgebungsbedingungen identifiziert (logische Szenarien) und entsprechende Äquivalenzklassen identifiziert (konkrete Szenarien) um mit einer endlichen Zahl an Testdurchführungen eine ausreichende Abdeckung des Parameterbereichs zu erreichen. Die so identifizierten Test-Szenarien wurden mit Hilfe eines automatisierten Testdummys auf abgesperrtem Testgelände durchgeführt. Dazu wird ein mit Luft gefüllter Dummy, automatisiert und reproduzierbar durch einen Roboter vor das Fahrzeug gezogen. Abbildung 52 zeigt einen beispielhaften Testaufbau.

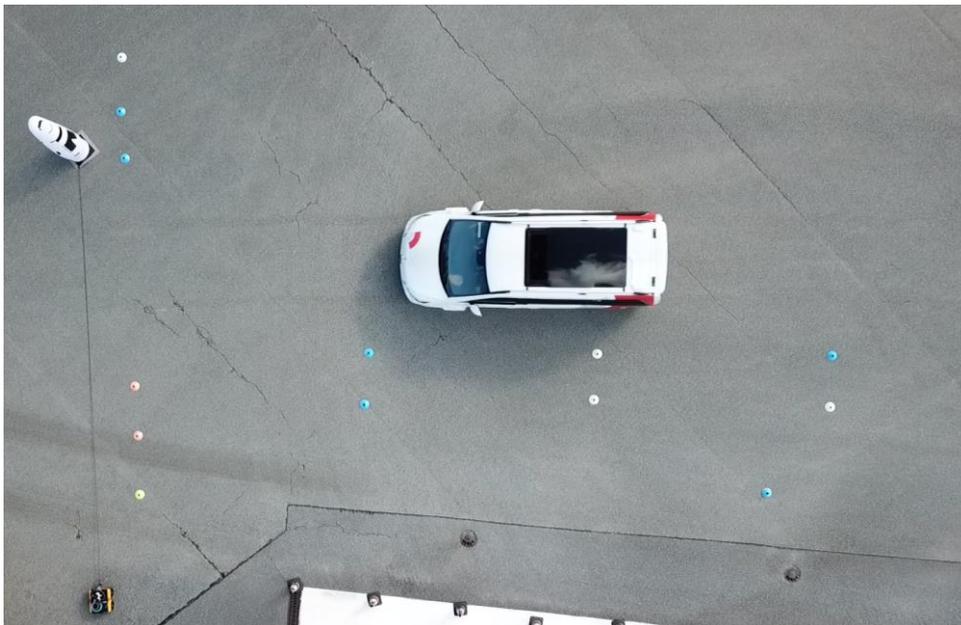


Abbildung 52: Testaufbau für das AEB mit Dummy.

Da wie in AP2 identifiziert sowohl von der False Negative Auslösung als auch der False-Positive Auslösung der Emergency Brake Funktionalität eine Gefährdung des Verkehrs ausgeht, können diese Tests mit Ansteuerung der Aktorik des Fahrzeuges nur auf abgesperrtem Gelände erfolgen. Um dennoch eine möglichst realistische und umfangreiche Verifikation des Systems zu ermöglichen, wurde die Verifikation der Auslöselogik, inklusive der Sensordatenerfassung, -Verarbeitung, Trajektorien-Planung und Umgebungs-Prädiktion nochmals separat verifiziert, indem ohne Auslösung der Aktorik Messkampagnen auf öffentlicher Straße mit einem Ibeo-Testträger durchgeführt wurden. Hierdurch lassen sich vor allem die Vermeidung von False-Positive Auslösungen zur Einhaltung des entsprechenden Sicherheitszieles verifizieren.

Die Systemtests seitens der **Hochschule Offenburg** umfassten sowohl die Kommunikationsschnittstellen aus AP5, sowie die in AP9 durchgeführten Integrationsschritte. Hierbei wurde in mehreren Stufen getestet:

Test der internen Komponenten - Die internen Komponenten der Hochschule Offenburg und deren Services wurden auf ihre korrekte Funktionsweise getestet. Hierbei wurden die externen Komponenten, die am Gesamtsystem teilhaben, durch Dummy-Implementierungen ersetzt, um hier komplett von anderen Partnern unabhängig zu sein.

Test der Kommunikationskette ohne Fahrzeug - In einem weiteren Schritt wurde die komplette Kommunikationskette der Hochschule Offenburg ohne Fahrzeug getestet. eine Umgebung ohne Fahrzeug aber unter Nutzung des Fahrzeug-Simulators der Universität Mannheim genutzt. Hierbei wurden die Befehle und Abfragen über die realen Kommunikationswege an den Simulator geschickt. Hierdurch entstand aus Kommunikationssicht bereits ein nahezu komplett fertiges und nahtloses Gesamtsystem.

Test der Kommunikation mit dem Fahrzeug - Diese Tests umfassten die komplette Kommunikationskette bis hin zu Fahrzeug. Hierbei wurden die gleichen Komponenten wie zuvor genutzt, allerdings wurde der Simulator durch das reale Fahrzeug ersetzt. Bei diesem Schritt wurde allerdings noch die Leitwarte umgangen und eine direkte Verbindung mit dem Fahrzeug aufgebaut.

Test der Kommunikation im Gesamtsystem - Der finale Schritt umfasste die Integration aller an der Kommunikation beteiligten Komponenten.

Gemäß der ursprünglichen Projektplanung hätte **DPD** diese Phase des Projekts durch die Bereitstellung von Flächen und Räumlichkeiten und die Durchführung von Tests auf einem Depotgelände von DPD (für die autonomen Fahrfunktionen auf dem Betriebshof) sowie auf einer Zustelltour (stilisiert auf einem entsprechenden Testgelände, aber mit DPD-Personal) unterstützt. Da dies aufgrund der geänderten Projektzusammensetzung, der zeitlichen Anpassungen im Projekt sowie der parallelen und räumlich verteilten Entwicklung des Versuchsträgers nicht in dieser Form möglich war, hat DPD stattdessen die Aufgabe der Konzeption und Fertigung des Fahrzeugaufbaus übernommen. Es sollte ein Aufbau gefertigt werden, welcher äußerlich den Charakter des Versuchsträgers als Zustellfahrzeug verdeutlicht, dabei aber das Thema autonomes Fahren vermittelt. Zudem musste den aktuellen Vorgaben beim autonomen Fahren Rechnung getragen werden und beispielsweise ein Fahrersitz für den Sicherheitsfahrer, ein weiterer Sitz für die Mitfahrt des Zustellers sowie ausreichend Fensterflächen aus Sicherheitsaspekten integriert werden. Da das Motionboard nicht auf irgendeiner bestehenden Fahrzeugplattform basiert, wurde schnell klar, dass innerhalb der Projektlaufzeit keine straßenverkehrs zugelassene Lösung entwickelt werden kann, was aber aufgrund der geplanten Fahrdemonstration auf einem abgeschlossenen Testgelände auch nicht nötig war. Dennoch musste die gesamte Konstruktion auf Basis der technischen Zeichnungen des Motionboards als Unikat entwickelt und gefertigt werden. Hierfür wurde seitens DPD die Firma Lagermax beauftragt, welche mit dem DPD-Konzern verbunden ist und mit einer ihrer Tochterfirmen auf genau solche Sonderaufbauten spezialisiert ist. Besondere Herausforderungen stellten dabei die notwendige Zugänglichkeit zur gesamten Steuerungstechnik des Fahrzeugs im Unterboden des Motionboards, die Integration sicherer Befestigungspunkte für Kameras und Sensorik sowie deren definierte Sichtbereiche und -winkel dar.

Zudem musste die Karosserie die für ihre Dimensionen notwendige Steifigkeit aufweisen, durfte aber gleichzeitig nicht zu schwer werden, um gemeinsam mit der Steuerungstechnik das zulässige Gesamtgewicht des Motionboards nicht zu überschreiten. Als Zugang zum Fahrzeug wurde ein Rolltor auf der rechten Seite des Fahrzeugs definiert, Fahrer- und Beifahrertür wurden bewusst weggelassen. Damit soll der Einsatzzweck des Fahrzeugs als „autonomer Pakettransporter“ betont werden, welche hauptsächlich autonom unterwegs ist und nur vom Fußweg aus geöffnet sowie be- und entladen wird. Das Thema autonomes Fahren sollte zudem durch einen vorn am Fahrzeug angebrachten Monitor mit der Funktion einer Car2Human Kommunikation betont werden.

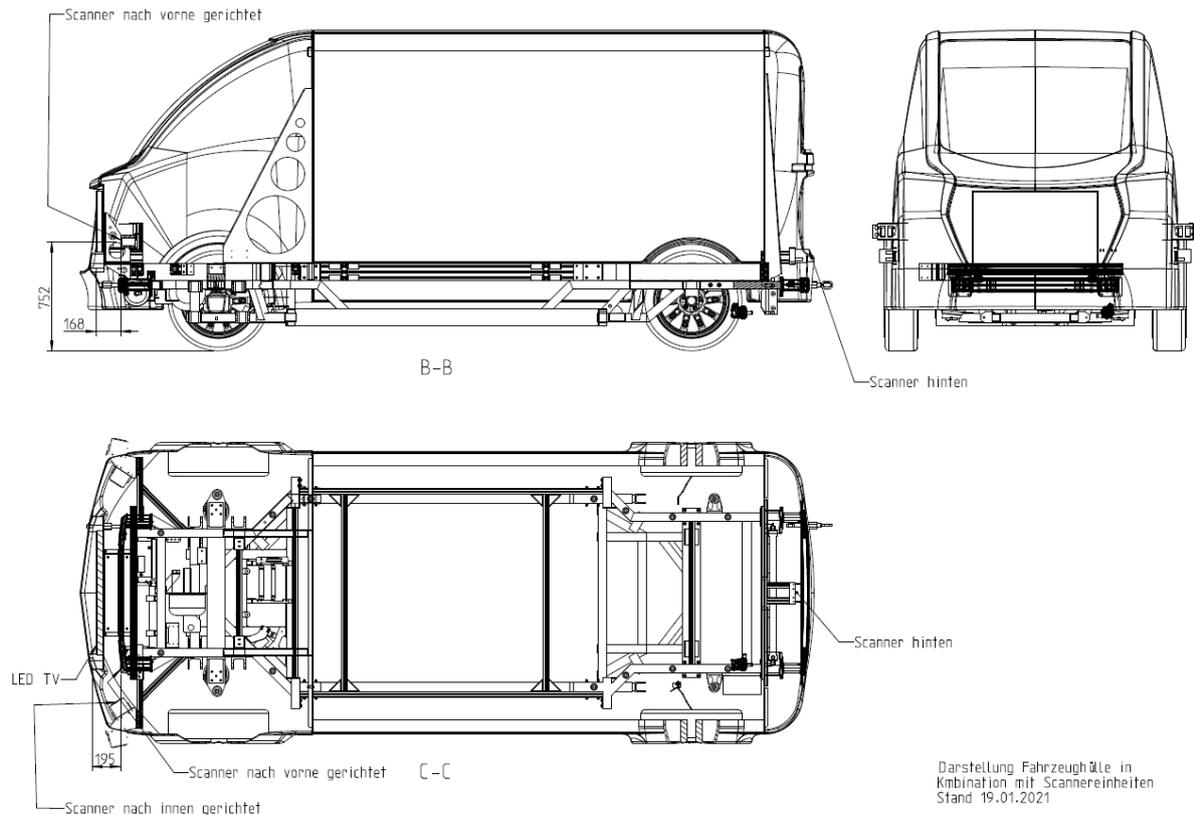


Abbildung 53: Darstellung Fahrzeughülle in Kombination mit Scannereinheiten.

Im Ergebnis wurde ein aus mehreren Teilen bestehender Aufbau in Österreich gefertigt und nach Braunschweig transportiert, wo er auf das Motionboard aufgesetzt wurde. Nachdem die Sensorik verbaut und kalibriert war, wurden per 3D-Drucker noch separate Abdeckungen für die empfindliche vordere Sensorik ergänzt.

Da aufgrund der beim Aufbau verwendeten unterschiedlichen Materialien das Gesamtbild einen uneinheitlichen Farbmix aufwies wurde entschieden, den Aufbau komplett zu folieren, auch um die Logos der Projektpartner und des Fördermittelgebers aufbringen zu können. Folierung und Design wurden durch DPD in Abstimmung mit den Projektpartnern entwickelt, das Fahrzeug wurde durch den DPD-Folierungsdienstleister vor Ort in Braunschweig foliert.

4 Änderungen in der Zielsetzung

Das Projekt VanAssist startete ursprünglich am 01.10.2018 u.a. mit dem Konsortialpartner VW Nutzfahrzeuge. Nachdem der Vorstand Entwicklung von VWN im April 2019 erklärt hatte, dass VWN die im Projekt zugesagte Leistung eines autonom fahrenden Demonstrators in der Klasse der leichten Nutzfahrzeuge bis Ende 2020 aus hausinternen Gründen nicht erbringen könne und sich daher aus dem Projekt zurückziehe, wurden die verbliebenen Konsortialpartner vor die Herausforderung gestellt, einerseits einen oder mehrere Partner für die Entwicklungsarbeiten von VWN zu finden und andererseits eine autonome Fahrzeugplattform zu identifizieren, um das Projekt fortsetzen zu können. Das VanAssist Konsortium war nach wie vor der Überzeugung, die im Projekt angestrebten Ziele erreichen zu können und führte die inhaltlichen Projektarbeiten fort, führte teilweise umfassende Anpassungen an den vom VWN-betroffenen Arbeitspaketen durch und identifizierte mit IfF und Ibeo zwei neue Projektpartner, mit denen sowohl die übergeordneten Ziele als auch der gesetzte Zeitrahmen des Vorhabens eingehalten werden konnte. Der weit überwiegende Teil der Forschungsarbeiten wurde wie geplant von den bisherigen AP- und TAP-Verantwortlichen fortgeführt, dabei übernahmen IfF und Ibeo den Großteil der Aufgaben von VWN. Lediglich einige wenige Teilaufgaben wurden wie im Folgenden ausgeführt angepasst:

4.1 Versuchsträger

Als Fahrzeugplattform wurde das sogenannte Motionboard der Hanseatischen Fahrzeug Manufaktur GmbH eingesetzt. Hierbei handelt es sich um eine elektrisch angetriebene modulare, anpassbare Fahrzeugplattform, die eine straßenrechtliche Grundlage für eine Vielzahl von Fahrzeugkonzepten bereitstellt, die ein sicheres und elektrisch angetriebenes Fahrgestell erfordern. Das Motionboard wurde gemäß ISO26262 und den geltenden Fahrzeugzertifizierungsstandards entwickelt und ermöglicht sehr schnell und äußerst flexibel eigene Fahrzeugkonzepte und Automatisierungsfunktionen umzusetzen. Durch vorbereitete Schnittstellen zur Ansteuerung der Aktoren (Lenkung, Gas, Bremse) und vorgesehene Möglichkeiten zur Sensorintegration eignete es sich somit sehr gut für den im Projekt vorgesehenen Aufbau eines automatisierten Transportfahrzeugs.

Ein weiterer Vorteil dieser Fahrzeugplattform war die Tatsache, dass die Bereitstellung des Motionboards im Projekt weitestgehend über die verfügbaren Projektmittel gedeckt werden konnte.

Weiterhin nutzte das IfF zwei eigene Versuchsträger zur Entwicklung hochautomatisierter Fahrfunktionen (TEASY3 & TIAMO). Die beiden Pkws der Kompakt- und Mittelklasse waren dabei vollständig am IfF aufgebaut (Integration Sensoren, Messtechnik) und anschließend in verschiedenen Förderprojekten u.a. zur Entwicklung und erfolgreichen Demonstration von automatisierten Fahrfunktionen in verschiedensten Umgebungen (Autobahn, Stadtverkehr, Parkhaus) eingesetzt worden. Die Entwicklungsarbeit umfasste dabei etwa Problemstellungen der Lokalisierung, Umfeldmodellierung, Handlungsplanung oder auch der abschließenden Regelaufgabe. Diese Basis wurde zunächst im Projekt VanAssist eingesetzt, um die Entwicklungsarbeit bis zur Verfügbarkeit des Motionboards effektiv zu nutzen. Die erzielten Zwischenergebnisse wurden dann auf das Motionboard portiert.

4.2 Sensorik

Die Kompetenzen des IfF und von Ibeo ergänzen sich, wie langfristige Kooperationen in der Vergangenheit gezeigt haben, sehr gut, um bestehende Herausforderungen beim Aufbau eines automatisierten Fahrzeugs bewältigen zu können. Das IfF konnte Fähigkeiten aus der Entwicklung automatisierten Fahrfunktionen für Pkws im städtischen Verkehr, basierend auf Daten von Ibeo Laserscannern, in das Projekt einbringen. Ibeo agierte dabei nicht im klassischen Sinne als Sensorlieferant, sondern hat insbesondere bezüglich der Ausrüstung des

Motionboards mit Sensoren, der Umfeldwahrnehmung, der Fahrsceneninterpretation sowie der funktionalen Absicherung der Handlungs- und Trajektorienplanung durch redundante Überwachungsfunktionen notwendige Aufgaben übernommen.

Die in diesem Vorhaben beschriebenen Entwicklungsarbeiten bauten auf den praktischen Erfahrungen und den wissenschaftlich-technischen Vorarbeiten der Projektpartner auf. Es sollte ausgehend von bestehenden Entwicklungen der Projektpartner eine Basisplattform entwickelt werden, die den besonderen Herausforderungen der angestrebten Operating Environments und den hohen Anforderungen an die Sicherheit gerecht wird.

4.3 Demonstration

Zum Zeitpunkt des Ausstiegs von VWN aus dem Projekt konnte noch kein geeignetes Gelände für die Erprobung während der Entwicklungsphase sowie für die Demonstration der Ergebnisse identifiziert werden. Über den Einstieg des IfF stand hier nun mit dem „Campus Nord“ der TU Braunschweig ein sehr gut geeignetes Gelände zur Verfügung. Hier konnten erste Erprobungen autonomer Fahrten auf einem nachgestellten Depotgelände stattfinden. Darüber hinaus war das Gelände aufgrund der urbanen Bebauung ebenfalls sehr gut geeignet, die Use-Cases des automatisierten Zustellprozesses zu erproben.

Aufgrund des verfügbaren Zeitrahmens sowie den derzeit geltenden rechtlichen Rahmenbedingungen war eine Demonstration im öffentlichen Verkehrsraum nicht länger umsetzbar. Das Test- und Demogelände „Campus Nord“ des IfF verfügte jedoch über eine typische urbane Bebauung, sodass gegenüber einem öffentlichen Gelände keine Nachteile hingenommen werden mussten.

4.4 Zusammenfassung und erreichte Ziele

Das ursprünglich anvisierte Ziel konnte vollumfänglich realisiert werden. Mit diesem innovativen Zustellprozess werden wesentliche Effizienzsteigerungen realisiert:

Der Zustellprozess wird optimiert, indem Lauf- und Fahrstrecken optimal miteinander kombiniert und teilweise parallel zurückgelegt werden. Dadurch werden die Laufwege des Zustellers effizienter, da „leere“ Rückwege zum Fahrzeug reduziert werden. Das Fahrzeug trägt sozusagen im Zustellprozess die Pakete autonom zum bestmöglichen Übergabepunkt an den Zusteller. Außerdem wird Parken in zweiter Reihe etc. komplett vermieden und damit ein Beitrag zur Entspannung der Verkehrssituation in Innenstädten geliefert. Da das Fahrzeug sich komplett elektrisch bewegt, werden auch CO₂-Emissionen weiter reduziert.

Zwar mussten im Vergleich zur ursprünglichen Planung aufgrund des Ausscheidens des Partners VW Nutzfahrzeuge Inhalte umkonzipiert (eCrafter vs. elektrisches Motionboard, keine Fahrten im öffentlichen Straßenverkehr da fehlende Zulassung des Motionboards) sowie eine Restrukturierung des Konsortiums durchgeführt werden (Aufnahme der beiden neuen Partner IfF und Ibeo), dennoch führte dies nicht zu grundsätzlichen Änderungen an der Zielsetzung des Projekts. Die Vorhabenbeschreibung wurde in Abstimmung mit dem Projektträger entsprechend angepasst, Änderungen an den grundsätzlichen Zielsetzungen gab es keine.

Auch das Projekt VanAssist war durch die weltweite Corona-Pandemie in Mitleidenschaft gezogen und es wurden zwischenzeitlich teils erhebliche Verzögerungen der Projektarbeiten aufgebaut, dennoch ist es den Projektpartnern gelungen, diese – vor allem auch durch die zwendungsneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit um sechs Monate – wieder zu kompensieren und alle gesetzten Ziele erfolgreich umzusetzen.

Einzig die zum Projektende anvisierte öffentliche Abschlusspräsentation mit praktischer Fahrdemo musste aufgrund der noch immer bestehenden Einschränkungen durch den COVID-19 ausgesetzt werden. Die Projekthinhalte werden stattdessen in virtueller Form auf der Homepage bereitgestellt bzw. sollen im September im Rahmen der Fachkonferenz Summit

ACIMobility in Braunschweig zumindest teilweise publikumswirksam präsentiert werden. Weitere Details finden sich unter dem nachfolgenden Kapitel 5.

4.5 F&E-Ergebnisse von dritter Seite

Im Verlauf von VanAssist sind den Projektpartner keine FE-Ergebnisse von dritter Seite bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens Relevanz hätten bzw. haben.

5 Öffentlichkeitswirksame Maßnahmen

5.1 Abschlusspräsentation

Die im VanAssist Konsortium entwickelten Ergebnisse sollten gemäß ursprünglichen Planungen gegen Ende des Projektzeitraums in Form einer öffentlichkeitswirksamen Abschlusspräsentation selbst einem breiten Publikum aus Fachszene aber auch interessierter Öffentlichkeit dargestellt werden. Hierfür wurden Gespräche mit den Organisatoren des Summit ACIMobility geführt und die Planungen entsprechend vorangetrieben, um im Rahmen dieser Fachkonferenz am 22. und 23. Juni 2021 in Braunschweig die Inhalte sowohl in Form von Fachpräsentationen, Infoständen als auch praktischer Fahrdemos zu demonstrieren.

Da die geplante Fachkonferenz aufgrund der noch immer bestehenden Einschränkungen durch die Corona-Pandemie und vor allem auch durch weiterhin bestehende Reiseverbote in Unternehmen und wissenschaftlichen Institutionen kurzfristig Anfang Juni abgesagt werden musste, wurde das VanAssist Konsortium vor die Herausforderung gestellt, Inhalte und Ergebnisse kurzfristig in anderer Art und Weise aufzuarbeiten, um diese nach Außen präsentieren zu können. Die Partner haben den Entschluss getroffen, einen Großteil der für die Konferenz geplanten Inhalte digital als Videomaterial aufzubereiten und auf der Homepage von VanAssist zum Download bereitzustellen. Diese Inhalte schließen neben dem Imagevideo (inkl. Indoornavigation und Outdoorszenario) auch Aufzeichnungen der Fachvorträge innerhalb von VanAssist, „Project Insights“ in Form von Kurzdarstellungen der Partner über ihre Inhalte im Projekt, als weiterführende Materialien der Partner aller Art aus dem Projekt ein. Als Zeitpunkt der Veröffentlichung der Inhalte auf der Homepage strebt das Konsortium Anfang August 2021 an. Eine Informationsmail mit offizieller Pressemitteilung, um diesen Termin publik zu machen, befindet sich bereits in Vorbereitung.

Neben der virtuellen Bereitstellung der Inhalte auf der Homepage plant das Konsortium aber weiterhin auch mit einer physischen Präsentation der Inhalte. Diese sollen in den Rahmen des Summit ACIMobility vom 23.-25. September in Braunschweig eingebunden werden. Neben einem Überblicksvortrag zu VanAssist ist auch die Fahrdemonstration des VanAssist Versuchsträgers vor Publikum geplant. Außerdem befindet sich gerade in Klärung, inwiefern weitere Fachvorträge in das Rahmenprogramm des Summit ACIMobility integriert werden können. Das IFF und die TUC planen bereits mit einem entsprechenden Fachvortrag.

Aller Corona-Widrigkeiten zum Trotz, werden die Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt breit kommuniziert werden und einen entsprechenden Impact in der Fachszene generieren.

5.2 Konferenzbeiträge und Publikationen

Im Berichtszeitraum wurden folgende Publikationen von den Projektpartnern erstellt, eingereicht und angenommen:

- Michael Pernpeintner (Universität Mannheim), „Collaboration as an Emergent Property of Self-Organizing Software Systems“, 13th IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO), June 2019
- Fabian Burzlauff, Maurice Ackel, Christian Bartelt (Universität Mannheim), „A mapping language for IoT device descriptions“, IEEE 43rd Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC), Milwaukee, Wisconsin (USA), July 2019
- Adina Aniculaesei, Jörg Grießer, Andreas Rausch, Karina Rehfeldt, Tim Warnecke (TU Clausthal), „Graceful Degradation of Decision and Control Responsibility for Autonomous Systems based on Dependability Cages“, 5th International Symposium on Future Active Safety Technology toward Zero Accidents in Blacksburg, Virginia (USA), September 2019

- Christian Schreckenberger, Christian Bartelt, Heiner Stuckenschmidt (Universität Mannheim), iDropout: Leveraging Deep Taylor Decomposition for the Robustness of Deep Neural Networks, „OTM Confederated International Conferences“, Rhodos (Greece), October 2019
- Detlef Schumann (BIT), Paul Czerwionka (IAV), „Fachgespräch zur Nutzung von digitalen Testfeldern für das automatisierte und vernetzte Fahren“, Projektbericht VanAssist, Berlin, 10. Oktober 2019
- Paul Czerwionka (IAV), Austauschgespräch mit Projekt „DiVA – Gesellschaftlicher Dialog zum vernetzten und automatisierten Fahren“, Berlin, November 2019
- Paul Czerwionka (IAV), „Automatisiertes Fahren in der Smart City“, Präsentation von VanAssist im Policy Forum, Berlin, Dezember 2019
- Jörg Grieser, Meng Zhang, Tim Warnecke, Andreas Rausch (TU Clausthal), “Assuring the Safety of End-to-End Learning based Autonomous Driving through Runtime Monitoring”, ICAPAI 2020: International Conference on Applied Artificial Intelligence, Halden (Norway), September 2020
- Saeed Abdolneshad, Manuel Schappacher, Axel Sikora (Hochschule Offenburg), „Secure Wireless Architecture for Communications in a Parcel Delivery System“, 5th IEEE International Symposium on Smart and Wireless Systems within the INTERNATIONAL CONFERENCES ON INTELLIGENT DATA ACQUISITION AND ADVANCED COMPUTING SYSTEMS, Dortmund (Germany), September 2020
- Tim Warnecke et Al. (TU Clausthal), “Teaching Novices Supervised Learning with Autonomous Model Vehicles”, 2020 IEEE 32nd Conference on Software Engineering Education and Training (CSEET), Munich (Germany), November 2020, DOI: 10.1109/CSEET49119.2020.9206215
- Frederik Nolte, Nils Wilken, Christian Bartelt (Universität Mannheim), “Rendezvous Delivery: Utilizing Autonomous Electric Vehicles to Improve the Efficiency of Last Mile Parcel Delivery in Urban Areas”, PerCom 2021 (19th International Conference on Pervasive Computing and Communications), March 2021

Geplante Konferenzbeiträge:

- Torben Hegerhorst, M. Kascha, A. Sonka, Roman Henze (TU Braunschweig), „Map-independent motion planning for highly automated vehicles in urban scenarios“, FAST-zero’21 - 6th International Symposium on Future Active Safety Technology Toward zero traffic accidents, Kanazawa, Japan
- Torben Hegerhorst, Maximilian Flormann, Roman Henze (alle TU Braunschweig), Meng Zhang, Andreas Vorwald, Andreas Rausch (alle TU Clausthal), „VanAssist - Integriertes Sicherheitskonzept für automatisierte Kleintransporter in der Paketlogistik“, Summit ACIMobility, Braunschweig, Germany, September 2021
- Paul Czerwionka, Fabian Pucks, Hans Henning Harte, Roman Blaschek, Robert Treiber, and Ahmed Hussein (IAV), „Precise self-localization for last mile delivery automated driving in unstructured environments“, 32nd IEEE Intelligent Vehicles Symposium, July 2021, Nagoya, Japan

5.3 Dissertationen

Zu Themen des VanAssist Projekts werden bzw. wurden diverse, zum Zeitpunkt der Verfassung dieses Berichts bereits weitgehend abgeschlossene Doktorarbeiten an Universitäten, Hochschule und Industriebetrieben durchgeführt. Diese Arbeiten konstituieren einen ansehnlichen Beitrag zur Förderung des technisch-wissenschaftlichen Nachwuchses; darüber hinaus

werden mit den zugeordneten, öffentlich verfügbaren Dissertationen, die in VanAssist entwickelten Ergebnisse und Methoden in besonderer Tiefe und Ausführlichkeit dargestellt.

5.4 Pressearbeit

- „Förderprojekt VanAssist baut das autonom fahrende Zustellfahrzeug der Zukunft“, Pressemitteilung des VanAssist-Konsortiums, Juni 2020.
- „automotion“, Publikation zu den Arbeiten des Projekts VanAssist in Deutsch und Englisch, Ausgabe 01/2020, April 2020.
- „Pilotprojekt VanAssist – Intelligente Zustellung: Ibeo Automotive Systems lässt Pakettransporter autonom fahren“, Pressemitteilung der Firma Ibeo, April 2020.
- Vorstellung des Projekts VanAssist vor dem Ausschuss Verkehr und Logistik der Industrie- und Handelskammer in Aschaffenburg durch die Projektpartner DPD und ZENTEC, Oktober 2020.
- „Besser Smart – Das Innovationsportal“, Bericht über und Interviews zu den aktuellen Forschungsarbeiten der TU Braunschweig auf dem Technikblog des Braunschweiger Stadtmarketings, November 2020.
- „Paketauto, Bitte kommen“, Bericht über das Projekt VanAssist sowie ein Interview mit dem Projektpartner bridgingIT in .data[re]port, Ausgabe Dezember 2020.

5.5 Internetauftritt

Die Projekthomepage unter der URL www.vanassist.de wurde in Abstimmung mit dem Projektträger und mit allen Projektpartnern im Projektzeitraum erstellt und ständig aktualisiert.

Außerdem dient die Internetplattform als zentrale Anlaufstelle für die Bereitstellung der virtuellen Eindrücke, Inhalte und Ergebnisse aus dem VanAssist Projekt (siehe hierzu Kapitel 5.1).

5.6 Projektvideos

Im Rahmen des Projekts VanAssist wurden mehrere Videos erstellt, die die Inhalte und Ergebnisse des Projekts visualisieren sollen. Zum Zeitpunkt der Berichterstellung sind dies:

- VanAssist Imagevideo (inkl. Darstellung der Indoornavigation als auch des Zustell-/Fahr-szenarios Outdoor)
- Project Insights in Form von Interview-Snippets durch alle Projektpartner
- Wissenschaftliche Fachvorträge zu den erarbeiteten Inhalten in VanAssist
- Weitere Videofootage der Partner für Eindrücke hinter den Kulissen des Projekts.

Diese sind auf der Projekt-Homepage unter www.vanassist.de zum Download bereitgestellt.

Nachfolgend finden sich stellvertretend für die beschriebenen Inhalte einige Eindrücke der Dreharbeiten für den Imagefilm, die Ende Dezember 2020 in Heidelberg (Indoor) und Anfang Juni 2021 am Campus Nord der TU Braunschweig (Outdoor) durchgeführt wurden.



Abbildung 54: Dreharbeiten zur Indoornavigation des Projekts VanAssist in Heidelberg im Dezember 2020



Abbildung 55: Komplett aufgebauter und funktionsfähiger VanAssist Versuchsträger im Rahmen der Dreharbeiten für das Imagevideo Anfang Juni 2021 in Braunschweig.

6 Ergebnisverbreitung und Verwertungsplan

Im Rahmen von VanAssist wurden von den Projektpartnern oder dem Vorhaben keine Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen durchgeführt bzw. Schutzrechte erteilt. Dennoch ergaben und ergeben sich aus den Ergebnissen des Förderprojekts heraus eine Reihe von Verwertungsmöglichkeiten, die nachfolgend dargestellt sind.

DPD

DPD wird die Ergebnisse des Projektes bei der Gestaltung und Prozessplanung der letzten Meile wie auch künftiger Niederlassungen berücksichtigen. Die Steuerung automatisierter Fahrzeuge muss in der Touren- und Tourgebietsplanung berücksichtigt und in den Prozessablauf der Zustellung integriert werden. Eine große Bedeutung kommt dabei den entsprechenden Funktionen der Zusteller-App zu. Hier besteht bereits heute die Möglichkeit einer Tourfolgeoptimierung, welche sich aber nur auf die vorgeschlagene Reihenfolge der Stopps bezieht. Für die Einbindung eines autonomen Fahrzeugs wie im Projekt müssen aber die im Zustellgebiet vorhandenen möglichen Haltepunkte in die Planung integriert werden. Zudem müssen Lauf- und Fahrstrecken gemeinsam optimiert und aufeinander abgestimmt werden, was eine weitere Planungsebene erfordert.

Für einen reibungslosen Betrieb eines solchen Fahrzeugs müssen zudem insbesondere in den Städten die Ladezonen digitalisiert werden, damit deren Belegung und Anfahrbarkeit bekannt sind und in der Zusteller-App berücksichtigt werden können. DPD wird daher diese Thematik in künftigen Kontakten mit Stadtverantwortlichen stärker betonen.

Mit dem Einsatz eines Fahrzeugs, wie es in diesem Projekt entwickelt wurde, kann durch die gesteigerte Produktivität bei der Zustellung sowie die Entlastung des Zustellers und die Fokussierung seiner Tätigkeit auf die eigentliche Übergabe der Ware an den Empfänger, die Qualität der Zustellung erhöht werden.

Machbarkeit und Effizienzsteigerungen der skizzierten Ansätze konnten im Rahmen des Projekts praktisch nachgewiesen werden.

Ibeo Automotive Systems GmbH

Der im VanAssist Projekt verwendete Sensor ibeoNEXT befindet sich zur Projektlaufzeit noch im Vorserienstadium. Während des Projektes konnten zum einen wertvolle Sensordaten für den Use Case Autonomes Fahren im urbanen Umfeld gesammelt werden. Zum anderen konnten Erfahrungen bei der Sensorintegration und im Einsatz des Sensors gesammelt werden (Vibrationsfestigkeit, Widerstandsfähigkeit, etc.) Die Daten haben Einfluss auf die Entwicklung des ibeoNEXT in den nächsten 2 Jahren bis Serienstart des Sensors. Darüber hinaus nehmen die gesammelten Erfahrungen Einfluss für zukünftige Sensorentwicklungen im Zeithorizont von 5 Jahren.

Im Projekt wurde ein neu entwickeltes Kalibrierungsverfahren erprobt, das auch bereits für die Ibeo-internen Versuchsträger verwendet wird und bei zukünftigen Projekten im Zeithorizont von 1-3 Jahren verwendet werden wird.

Das für das Projekt entwickelte Notbremssystem "Automatic Emergency Brake" wird nach Projektende auf Ibeo-internen Versuchsträgern weiter erprobt und validiert. Das System soll zukünftig in allen autonomen Fahrzeugen der Firma Ibeo zur Absicherung eingesetzt werden und stellt im Zeithorizont 3-5 Jahre ein potenzielles Produkt dar.

IAV

IAV verfolgt mit seiner Teilnahme am Projekt VanAssist den Aufbau von umfangreichem eigenem Know-how im Bereich automatisiertes vernetztes Fahren. Insbesondere das Thema Lokalisierung und digitale Karten ist ein Eckpfeiler. Dabei finden die mit dem Projekt aufgebauten Kenntnisse und Fähigkeiten sowohl Eingang in zukünftige IAV Kundenprojekte, bei denen es

darum geht, zukünftige Fahrzeuggenerationen für das automatisierte vernetzte Fahren zu erüchtigen als auch in IAV eigenen kommerziellen Aktivitäten.

BridgingIT GmbH

Für die BridgingIT GmbH ist das Projekt VanAssist aus Überlegungen entstanden, die Deep Map™ Technologie in einem Forschungs- und Entwicklungsprojekt weiterzuentwickeln und kommunikative Ansätze daraus abzuleiten.

Die aktuellen Entwicklungen zeigen deutliches Potential für eine Vermarktung bei weiteren Kunden in der gesamten Paket-Dienstleistungsbranche. Darüber hinaus sind auch in der Ableitung Dienstleister, die in einem industriellen Komplex Zustelltätigkeiten durchführen, von Interesse. Beispielhaft dafür sind Instandhaltungs- und Wartungstätigkeiten, wo das Auffinden konkreter Positionen in einem definierten dreidimensionalen Raum – hier ein Industriekomplex – sinnvoll ist. Hier spielt u.a. auch der neue Industriestandard für Ortungstechnologie omlox eine zentrale Rolle, der durch VanAssist eine wichtige Beispiel-Anwendung erhält. Darüber hinaus sind neue Ideen im Gesundheitswesen entstanden, um die Technologie zur Erfassung und Lokalisierung von Klinik-Assets zu verwenden.

Das Thema wird in den kommenden Jahren sehr schnell an Bedeutung zunehmen, da signifikante Teile der Verkehrswende-Experten diese Option bereits heute als realistisch für einen Zeithorizont bis 2030 ansehen. Planungsprojekte für Infrastruktur und generell für Strukturänderung müssen die Erkenntnisse aus solchen Projekten verwerten. Die Umsetzung aus einem F&E-Vorhaben in einen realen Kontext bedarf einer kreativen Interpretation der Inhalte. Neben den Zielkunden aus der Automotive-Industrie ist es für BIT möglich, vor allem im Bereich der kommunalen Infrastruktur sowie bei Betreibern des ÖPNV Erfahrungswerte aus diesem Projekt abzuleiten.

Die wirtschaftliche Verwertung stellt sich im Wesentlichen durch zwei Faktoren dar, die genauso auch im Verwertungsplan des Antrages beschrieben wurden:

- BIT ist durch und mit VanAssist in der Lage Anwendungsszenarien demonstrieren zu können
- Durch den Aufbau der Demoszenarien hat BIT signifikanten Wissenszuwachs im Gesamtkontext der eigenen "seamless Indoor-Outdoor Navigation", der Verortungsinfrastruktur, der Weiterentwicklung der Deep Map™ Technologie und des Deep Hub erreicht.

Das Verwertungsziel des Zusammenspiels von klassischer Fußgängernavigation und autonomer Fahrzeugnavigation und die Reichweite der Navigationslösungen durch räumlich ausge dehntere Szenarien zu erhöhen, stand im Fokus des Projektes. Der Plan, die zu erwartenden Projektergebnisse und neuen Impulse sowohl in die technische als auch in die strategische und wirtschaftliche Weiterentwicklung der eigenen Navigationstechnologie Deep Map™ einfließen zu lassen, hat sich ausgezahlt bzw. bewahrheitet. BIT wurde in die Lage versetzt, heute vielfältige Anwendungsbeispiele nicht nur theoretisch zu diskutieren, sondern im Labor zu zeigen. Hier ist das neu geschaffene T.E.C. (Technology Experience Center) der bridgingIT-Gruppe (nicht aus Projektmitteln finanziert) eine „Heimat“, um auch nach Projektabschluss über einen längeren Zeitraum die Szenarien zeigen zu können.

Diese Erfolge planen wir zur weiteren Verwertung den Akteuren der KEP-Branche zu präsentieren.

Eine weitere wirtschaftliche Verwertung zeichnet sich im Gesundheitswesen ab. Hier haben Gespräche und konkrete Anfragen von großen Kliniken einen Bedarf zur Lokalisierung von Assets gezeigt. Dabei spielt sicher die COVID-Pandemie eine Rolle, da das Suchen und Finden von Dingen (ein Krankenbett oder ein Beatmungsgerät) zum Teil sehr schnell gehen muss. Hier kann Ortungstechnologie den entscheidenden Zeitgewinn und Transparenz in eine kritische Infrastruktur bringen.

Die Verwertungskonzepte für den Einsatz im klinischen Umfeld konnten noch nicht abschließend untersucht werden, da insbesondere die Ressourcen im Gesundheitssektor aktuell nicht zur Verfügung stehen. Die Konzepte der Indoor-Navigation und insbesondere der Lokalisierung sind hier aber ein weites Anwendungsfeld, welches wir weiter untersuchen bzw. konkrete Projekte realisieren wollen.

Eine weitere wirtschaftliche Verwertung hat sich im Projektzeitraum dahingehend konkretisiert, dass im Prinzip alle Verortungsprozesse in abgeschlossenen Räumen, Gebäuden oder Areas potenziell relevante Anwendungsfälle sind. Als sehr konkrete Anknüpfung haben sich die Aktivitäten, die sich aus der omlox Initiative (Ortungsstandard für die Industrie) ergeben haben, parallel zum Projekt VanAssist entwickelt.

omlox ist der erste Industry 4.0-Ortungsstandard für Lokalisierungstechnologien. Ziel der omlox-Initiative ist es, Industriekunden dabei zu unterstützen, Hard- und Software unterschiedlicher Hersteller ohne großen finanziellen Mehraufwand ergänzend einzusetzen. Er kombiniert Lokalisierungstechnologien wie Ultrabreitband, RFID, 5G, GPS oder andere. Auf den Standard können künftig sowohl Hardware- als auch Softwarelösungen zugreifen. Ein Logo auf den Produkten garantiert, dass sie für omlox anschlussfähig sind. Durch das Einbeziehen verschiedener Ortungstechnologien lassen sich Produkte durchgängig verfolgen. omlox ermöglicht das Lokalisieren von Gabelstaplern, Drohnen, fahrerlosen Transportsystemen oder Werkzeugen verschiedener Hersteller mit nur einer Lösung. Positionsdaten lassen sich somit in der Fabrik wesentlich breiter nutzen.

Im Projekt VanAssist konnten diverse der Basistechnologien erprobt werden und die Ergebnisse finden im omlox-Standard eine Anwendung. Insbesondere im Bereich dessen, was wir im VanAssist Projekt als Deep Hub (Zentrale Applikation für Realtime Location Services) nennen, wurde im omlox Standard ein omlox Hub entwickelt. Hier die Gesamtarchitektur im Industriekontext:

omlox und VanAssist ergänzen sich aus der Demonstrationperspektive für neue Technologie hervorragend. Die Möglichkeiten der praktischen Anwendbarkeit kann im bereits genannten T.E.C. Kunden individuell demonstriert werden.

Die Ziele des Verwertungsplanes, durch das Projekt neue Impulse für die Indoor Navigation in Kombination mit der Deep Map™ zu erzeugen, wurde erreicht und von den Erwartungen her übertroffen.

IFF

Das Institut für Fahrzeugtechnik hat im Rahmen des Projektes einen neuartigen Fahrzeugversuchsträger für das automatisierte Fahren beschafft und aufgebaut sowie zum automatisierten Fahren ertüchtigt. Damit wurden die bereits bestehenden Erfahrungen in der Integration von neuartigen Sensor- und Aktortechnologien sowie Fahrfunktionen auf RCP-Basis vertieft und erweitert. Besonders das neuartige Fahrzeugkonzept (rolling chassis) des Versuchsträgers PLUTO bildet mit seiner Modularität vielfältige Möglichkeiten zur Darstellung verschiedenster Anwendungsfälle, wie bspw. eines People-Movers und damit eines Level-5-Systems zur Personenbeförderung. Der prototypische Charakter des Fahrzeuges erlaubt zudem die unkomplizierte Weiterentwicklung des Fahrzeuges. So wird bspw. auch eine hardwareseitige Erweiterung um fahrdynamische Systeme in Betracht gezogen.

Die bestehenden Funktionalitäten von automatisierten Fahrfunktionen konnten innerhalb des Projekts umfangreich weiterentwickelt werden. Die entwickelten Konzepte sowie Implementierungen befähigen das Institut für Fahrzeugtechnik zur Entwicklung leistungsfähiger Algorithmen des automatisierten Fahrens. Insbesondere die Nutzung und Vernetzung verschiedener Entwicklungsumgebungen (Anbindung ROS2) wichtige Kenntnisse, welche in zukünftige Entwicklungen gewinnbringend eingebracht werden können.

Die gemachten Erfahrungen fließen bereits gewinnbringend in das Forschungsprojekt „autoMoVe“ ein, weitere Förderprojekte mit starkem Bezug zu den erarbeiteten Ergebnissen befinden sich in der Antragsphase. Darüber hinaus werden die Erkenntnisse umfassend in mehrere Lehrveranstaltungen des IfF eingebracht und ergänzen dort einerseits bestehende Inhalte um neue Erkenntnisse, andererseits werden auch gänzlich neue Aspekte integriert. Zusätzlich wurden im Rahmen der Aktivitäten diverse Möglichkeiten für Studierende geschaffen, in diesen innovativen Themengebieten Abschlussarbeiten anzufertigen bzw. als Wissenschaftliche Hilfskraft zu partizipieren. Die Erkenntnisse bieten dabei weiterhin eine umfassende Grundlage für die Ausbildung von Doktoranden sowie die Anknüpfung zu zukünftigen Forschungsvorhaben, welche die Themenstellungen kontinuierlich weiterentwickeln und neue Felder erschließen.

HSO und InES

Die wissenschaftlichen Projektpartner HSO und InES konnten im Rahmen des Projekts den Transfer von Forschungsergebnissen in einen praxis- und industrienahen Use Case erfolgreich vollziehen. Die dabei gewonnenen Erfahrungen konnten darüber hinaus über wissenschaftliche Publikationen bereits mit der wissenschaftlichen Community geteilt werden. Hierdurch konnten auch die Promotionsvorhaben, von im Projekt arbeitenden Doktoranden, weiter vorangetrieben werden. Des Weiteren wurden die im Projekt gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse in diversen Lehrveranstaltungen der wissenschaftlichen Partner eingebracht. Zusätzlich wurde den Studierenden der verschiedenen Partner die Mitarbeit an den innovativen Themengebieten im Projekt in Form von Abschlussarbeiten oder Hilfwissenschaftlichen Tätigkeiten ermöglicht.

Neben den bereits erfolgten Maßnahmen zur Ergebnisverbreitung und -verwertung stellen die im Projekt gewonnenen Erfahrungen und erzielten Ergebnisse eine wichtige Rückmeldung für die Planung zukünftiger Forschungsvorhaben dar. Hierbei ist insbesondere die experimentelle Forschung im Bereich Data Science von der umfangreichen Verfügbarkeit realer Daten abhängig.

TUC

Das Institut für Software and Systems Engineering (ISSE) der TU Clausthal (TUC) hat im Rahmen des Projektes eine umfangreiche Laborinfrastruktur mit mehreren ADAS Modelfahrzeugen und einen Industrie-PC aufgebaut. Diese Laborumgebung konnte innerhalb des Projektes umfangreich verwendet werden und diente der Evaluation und Demonstration des Konzeptes zur Absicherung des autonomen Fahrens. Hierbei wurde bereits bestehendes Wissen zur Absicherung des autonomen Fahrens während der Laufzeit und der Überwachung durch den Menschen sowie den Eingriff durch den Remote Leitstand, vertieft und erweitert. Ergebnisse dieser Forschungstätigkeiten wurden im Rahmen von Publikationen veröffentlicht. Dadurch konnten Promotionsvorhaben der im Projekt arbeitenden Doktoranden weiter vorangetrieben werden. Zusätzlich wurden Studierenden des ISSE die Mitarbeit an diesem innovativen Konzept in Form von Abschlussarbeiten oder Hilfwissenschaftlichen Tätigkeiten ermöglicht.

Das aufgebaute Wissen floss bereits gewinnbringend in das Projekt „autoMoVe“²⁰ ein und wird auch in zukünftigen Projekten, wie z.B. „SafeWahr“²¹ und weiteren beantragten Projekten weiterentwickelt.

Es ist geplant, die aufgebaute Laborumgebung in zukünftigen Projekten, wie z.B. „SafeWahr“, und zukünftigen Projektanträgen einzusetzen. Zudem dient die Laborumgebung, inklusive der ADAS Modelfahrzeuge und Industrie-PC, als zentrale Plattform innerhalb des ISSE, um

²⁰ autoMoVe: Rekonfigurierbare Fahrzeugkonzepte für den autonomen Fahrbetrieb, Fördergeber: Europäischer Fond für regionale Entwicklung (EFRE) und NBank.

²¹ SafeWahr: Sichere Freigabe und zuverlässiger Serienbetrieb durch kontinuierliches echtzeitfähiges Monitoring der Umgebungswahrnehmung autonomer Fahrzeuge, Fördergeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).

aktuelle und zukünftige Forschungstätigkeiten der Doktoranden sowie Projektarbeiten bzw. Abschlussarbeiten von Studierenden, zu evaluieren und zu demonstrieren. Darüber hinaus wird die Verwendung der Laborumgebung für Bildungszwecke, im Rahmen von Lehrveranstaltungen bzw. Workshops geplant.